

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG**

Mechanisches Verhalten von HTR-Beton

Teil 2: Dauerstandsversuche

Teil 3: E-Modulversuche

Abschlußbericht

Dr.-Ing. U. Diederichs

April 1986

**Untersuchung im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH,
Mannheim.**

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministers für Forschung
und Technologie**

HTR-Betonversuche

- Dauerstandsversuche -

Abschlußbericht

erstattet von

Dr.-Ing. U. Diederichs

April 1986

Dr. U. Diederichs
Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH
Mannheim
April 1986

Untersuchung im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim
Bestellung: 649.513.1001.09090.30/200 vom 03.02.1984.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Allgemeines	3
2. Aufgabenstellung	3
3. Experimentelles	5
3.1 Herstellung der Probekörper	5
3.2 Versuchsdurchführung	7
4. Versuchsergebnisse	9
4.1 Druckfestigkeit, E-Modul und Rohdichte bei Raumtemperatur	
4.1.1 Basaltbeton	9
4.1.2 Rheinkiesbeton	14
4.2 Dauerstandsversuche	17
4.2.1 Basaltbeton	17
4.2.2 Rheinkiesbeton	23
4.3 Betonverformungen während der Dauerstandsbelastung . . .	27
5. Zusammenfassung	29
6. Schrifttum	33
7. Anhang	34

1. Allgemeines

Mit Schreiben vom 03.02.1984 beauftragte die Firma Hochtemperatur-Reaktor-bau GmbH, Mannheim, das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig mit der Durchführung von Dauerstandsversuchen an Basalt- und Rheinkiesbeton nach vorgegebener Zusammensetzung (HRB-Spezifikation: PNP - 5131 - CB - GHRA 000 752 vom 29.12.1983).

Zunächst sollte mit der Herstellung und Prüfung der Proben aus Basaltbeton begonnen werden. Die erzielten Ergebnisse wurden bereits in den Zwischenberichten /1/ bzw. /2/ zusammenfassend der Auftraggeberin mitgeteilt.

Die Freigabe zur Herstellung der Proben aus Rheinkiesbeton erfolgte nach telefonischer Vorankündigung am 13.07.1984 mit dem Schreiben TR 3 - Web/LT vom 20.07.1984. Über die Herstellung der Versuchskörper, den Stand der Versuche mit Rheinkiesbeton und die bis zum Juli 1985 erzielten Versuchsergebnisse wurden ebenfalls Zwischenberichte /3, 4/ erstattet.

Im vorliegenden Abschlußbericht sind alle Versuchsergebnisse zusammengefaßt. Vorangestellt sind dem Bericht die Aufgabenstellung und Angaben über die Durchführung der Versuche.

2. Aufgabenstellung

Es sollten Dauerstandsversuche an HTR-Betonprobekörpern bei erhöhten Temperaturen durchgeführt werden, da über das Dauerstandsverhalten von Beton, der ständig erhöhten Temperaturen ausgesetzt ist, keine Untersuchungen vorliegen, die Kenntnis dieser Eigenschaft jedoch für eine zuverlässige Bemessung unabdingbar notwendig ist.

Im einzelnen sind die Versuchsdurchführung und der Versuchsumfang in der o. g. Bestellung, dem dazugehörigen Angebot - Nr. 181/Di/Schr vom 10.05.1983 - des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig und der HRB-Spezifikation PNP - 5131 - CB - GHRA - 000 752 vom 29.12.1983 festgelegt.

Den zu erwartenden unterschiedlichen Feuchtezuständen des Betons im Bauwerk wurde dadurch Rechnung getragen, daß die Proben sowohl im versiegelten Zustand (kein Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung) als auch im unversiegelten Zustand (Austrocknung möglich) geprüft wurden.

Die unversiegelten Versuche sowie die Herstellung der dafür erforderlichen Probekörper wurden im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig und die versiegelten Versuche in der Gesamthochschule Kassel durchgeführt.

Für diese Versuche wurde aus Handhabungs- und Kostengründen (insbesondere im Hinblick auf die Versiegelungsgefäße) die Verwendung von Zylindern \varnothing 80/240 mm vorgesehen.

Die erforderliche Probekörperanzahl und die Anzahl der durchzuführenden Versuche ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Erforderliche Anzahl der Probekörper und der durchzuführenden Dauerstandsversuche

Temperatur	Anzahl der Probekörper bei Versuchslasten				Summe
	90 %	70 %	50 %	30 %	
70 °C	3	3	-	-	6
120 °C	3	3	3	-	9
200 °C	3	3	3	3	12
unversiegelte Versuche	9	9	6	3	27 ^{*)}

*) erforderliche Probekörperanzahl für eine Betonsorte

Aus der Tabelle 1 geht hervor, daß für die unversiegelten Versuche bei Prüfung beider Betonsorten die Herstellung von mindestens 54 Probekörpern notwendig war. Ferner waren Probekörper für den Gütenachweis mit zu berücksichtigen.

Entsprechend Tabelle 1 sollten je nach Temperaturstufe bei Raumtemperatur 30 % bis 90 % der Kurzzeitbruchlast aufgebracht werden. Anschließend sollte die Aufheizung unter Last mit einer Geschwindigkeit von 5 K/h erfolgen. Nach einer Standzeit von 30 Tagen ohne Bruch konnte der jeweilige Versuch beendet werden.

3. Experimentelles

3.1 Herstellung der Probekörper

Für die Herstellung der Probekörper waren je Betonart zwei Termine notwendig, an denen Zylinder für die Dauerstandsversuche (\emptyset 8 cm, l = 30 cm), Proben für die Güteprüfungen (Zylinder \emptyset 15 cm, l = 30 cm und Würfel 15/15/15 cm³), Würfel für Biaxialversuche (20/20/20 cm³) und Reservekörper betoniert wurden. Die einzelnen Betoniertermine sowie die Bezeichnungen der Probekörper sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Betoniertermine und Bezeichnung der Probekörper

Herstellungsdatum /Beton-Nr.	Probenbezeichnung	Probenanzahl und -art
14.12.1983 Nr. 228/83 (Basaltbeton)	A 101 ÷ A 136 A 141 ÷ A 143 AW 101 ÷ AW 109 AW 110 ÷ AW 121	36 Zylinder \emptyset 8 cm, l = 30 cm 3 Zylinder \emptyset 15 cm, l = 30 cm 9 Würfel 15/15/15 cm ³ 12 Würfel 20/20/20 cm ³
15.03.1984 Nr. 46/84 (Basaltbeton)	A 301 - A 336 A 341 - A 348 AW 301 - AW 312	36 Zylinder \emptyset 8 cm, l = 30 cm 8 Zylinder \emptyset 15 cm, l = 30 cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³
01.10.1984 Nr. 152/84 (Rheinkiesbeton)	R 101 ÷ R 136 R 141 ÷ R 143 RW 101 ÷ RW 112 RW 113 ÷ RW 124	36 Zylinder \emptyset 8 cm, l = 30 cm 3 Zylinder \emptyset 15 cm, l = 30 cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³ 12 Würfel 20/20/20 cm ³
22.10.1984 Nr. 164/84 (Rheinkiesbeton)	R 301 ÷ R 336 R 341 ÷ R 348 RW 301 ÷ RW 312 RW 313 ÷ RW 317	36 Zylinder \emptyset 8 cm, l = 30 cm 8 Zylinder \emptyset 15 cm, l = 30 cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³ 5 Würfel 20/20/20 cm ³

Je Betoniertermin wurden in einem Zwangsmischer mit 350 dm³ Nenninhalt die Mischungen für ca. 220 - 250 dm³ verdichteten Frischbeton hergestellt. Die Kies- und Basaltzuschläge des Basaltbetons waren getrocknet. Der Sand wurde - wie angeliefert - feucht zugegeben.

Beim Rheinkiesbeton wurde der Sand (0/2 mm) getrocknet und der Rheinkieszuschlag - wie angeliefert - feucht zugegeben.

Die Mischzeit betrug jeweils drei Minuten. Der Verzögerer wurde mit dem Zugabewasser zugegeben. Nach der Fließmittelzugabe wurde der Beton weitere drei Minuten gemischt. Je Mischung wurde vor Fließmittelzugabe das Ausbreitmaß und nach der Fließmittelzugabe das Ausbreitmaß, das Verdichtungsmaß, die Rohdichte und der LP-Gehalt gemessen.

Die 15er Würfel und die zylindrischen Probekörper (Ø 15 cm, l = 30 cm) wurden in handelsüblichen Kunststoffformen betoniert. Für die Zylinder (Ø 8 cm, l = 30 cm) fanden dichte Stahlschalungen Verwendung und für die 20er Würfel handelsübliche zerlegbare Stahlschalungen. Die Verdichtung erfolgte in allen Fällen auf einem Rütteltisch. Die Verdichtungszeit betrug jeweils 60 Sekunden.

Nach ausreichender Erhärtung, gewöhnlich im Alter > 28 d, wurden die ursprünglich 300 mm hohen Zylinder (Ø 8 cm) mit einer Diamantsäge an der Betonieroberseite naß auf 24,5 cm abgelängt. Anschließend wurde die gesägte Stirnseite auf einer Schleifmaschine mit diamantbesetzter Topfscheibe naß plangeschliffen. Die Zylinder mit Durchmesser 15 cm wurden nur an der Betonieroberseite naß plangeschliffen.

Alle Proben wurden nach dem Betonieren bis zum Ausschalen (nach einem Tag) feucht gehalten und nach dem Ausschalen bis zur Durchführung der Güteprüfungen bzw. bis zum jeweiligen Versuchsbeginn unter Wasser gelagert.

Weitere Einzelheiten zur Herstellung der Probekörper sind in den Zwischenberichten "HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung" /3/ zusammengestellt.

3.2 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Versuche standen am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz ein Hochtemperatur-Kriechprüfstand, in dem jeweils drei Probekörper gleichzeitig bei hohen Temperaturen untersucht werden können (vgl. Bild 1), und eine servohydraulische Hochtemperatur-Prüfmaschine zur Verfügung (vgl. Bild 2). An den Prüfanlagen waren vor Versuchsbeginn kleinere Umbauten und Ergänzungen erforderlich.

Beim Hochtemperatur-Kriechprüfstand werden die Kräfte pneumatisch erzeugt und mit Hilfe von Druckkissen auf die Belastungsstempel übertragen (vgl. Bild 3). Das Einstellen der Belastungshöhe und das Nachjustieren erfolgen per Hand. Das Belastungssystem arbeitet unabhängig vom Stromversorgungsnetz und ist deshalb besonders für Langzeituntersuchungen geeignet, da kurzzeitige Stromabschaltungen oder -ausfälle die Versuchsdurchführung nicht wesentlich beeinträchtigen.

In diesem Prüfstand wurden vorwiegend die Dauerstandsversuche mit niedrigen Belastungsniveaus durchgeführt, da hier die maximalen Standzeiten von 30 Tagen erwartet wurden.

Bei hohen Belastungsniveaus ($> 70\%$) wurde der Bruch im Verlaufe der Aufheizung erwartet. Diese Versuche wurden vorzugsweise in der servohydraulischen Hochtemperaturprüfmaschine durchgeführt, da diese Maschine einen einfacheren, weniger zeitaufwendigen Probenwechsel erlaubt.

Die Kraftmessung erfolgt bei der servohydraulischen Prüfmaschine mit Hilfe einer Ringtorsionskraftmeßdose (Nennkraft 400 kN, Gesamtfehler bezogen auf Nennkraft $< \pm 0,02\%$; genauer als Güteklasse I nach DIN 51 220).

Beim Hochtemperatur-Kriechprüfstand wird zur Bestimmung der Prüfkraft eine Druckmessung herangezogen. Die Druckmessung erfolgte mit Feindruckmanometern (Nenndruck 160 bar, Kl. 0,6).

Vor Beginn der Versuche wurden umfangreiche Eichversuche durchgeführt, wobei die aus dem Luftdruck p ermittelte Prüfkraft F_p der mit Hilfe einer

Kraftmeßdose (Nennkraft 200 kN, Gesamtfehler bezogen auf Nennkraft $\leq 0,1 \%$) gemessenen Kraft F_K gegenübergestellt wurde. Folgende Beziehung zwischen Prüfkraft F_K und Luftdruck p wurde ermittelt:

$$F_K \text{ [kN]} = 3,017 \cdot p \text{ [bar]} \quad (1)$$

Bei dem verwendeten Probekörperdurchmesser von 80 mm ergibt sich eine Prüfspannung σ_K von

$$\sigma_K \text{ [N/mm}^2\text{]} = 0,600 \cdot p \text{ [bar]} \quad (2)$$

Die Reproduzierbarkeit der Messungen lag in dem interessierenden Bereich (ca. 25 bis 80 bar) bei $\leq 2 \%$.

Die Verformungen wurden sowohl beim Hochtemperaturkriechstand als auch bei der servohydraulischen Hochtemperaturprüfmaschine jeweils mit Hilfe von zwei Dilatometern (bestehend aus einer temperaturbeständigen Klemmvorrichtung, zwei Zerodurstäben, einem Parallelenkersystem und einem induktiven Wegaufnehmer mit angeschlossenen Trägerfrequenzmeßverstärker) gemessen. Die Meßstrecke liegt symmetrisch zur Probekörpermitte und hat eine Länge von 180 mm. Die Meßergebnisse sind somit frei von Randeinflüssen.

Die Beheizung der Proben erfolgte über elektronisch geregelte, senkrecht angeordnete Röhrenöfen bei den Hochtemperaturkriechprüfständen bzw. über einen 3-Zonen-Kammerofen bei der servohydraulischen Hochtemperatur-Prüfmaschine.

Die Temperaturen wurden jeweils auf der Mantelfläche der Proben im Abstand von ca. 3 cm von den oberen bzw. unteren Probenstirnflächen mit Eisenkonstantan-Thermoelementen (nach DIN 43 710) gemessen und mit Hilfe einer Meßdatenerfassungsanlage bzw. einem Kompensations-Schreiber aufgezeichnet.

Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Dauerstandsfestigkeiten ist schematisch in Bild 4 dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wurden die Proben unter einer geringen Belastung in die Prüfmaschine bzw. in die "Kriechprüfstände" eingebaut. Danach wurden die Proben zunächst dreimal bis ca. 30 % der in Parallelversuchen ermittelten Festigkeit belastet. Dabei wurde jeweils die elastische Verformung gemessen. Anschließend erfolgte bei Raumtemperatur die Belastung der Probekörper mit dem angestrebten Belastungsniveau zwischen 30 und 90 %.

Unter Belastung wurden dann die Probekörper mit 5 K/h, gemessen auf der Probenoberfläche, bis zum Erreichen der angestrebten Versuchstemperatur (70, 120 oder 200 °C) aufgeheizt, sofern nicht schon in der Aufheizphase, z. B. zum Zeitpunkt t^* , ein Versagen eintrat. Nach dem Erreichen der angestrebten Versuchstemperatur wurde die Temperatur bis zum Bruch der Proben (z. B. Zeitpunkt t^{**}) konstant aufrechterhalten.

Tritt nach 30 Tagen (Zeitpunkt t_3) kein Bruch der Probe ein, wird die Probe erneut zur Bestimmung des E-Moduls dreimal be- und entlastet ($t_3 \dots t_4$). Anschließend wird die Probe nochmals ca. 2 h unter Last bei der Versuchshöchsttemperatur homogenisiert ($t_4 \dots t_5$), bevor zum Zeitpunkt t_5 die Abkühlung mit ≤ 5 K/h erfolgt.

Der Versuch wird nach der Bestimmung des E-Moduls bei Raumtemperatur mit einem σ - ϵ -Versuch zur Ermittlung der Restfestigkeit beendet.

Die Verformungen der Proben werden während des Versuchs ständig registriert.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten bei Raumtemperatur

4.1.1 Basaltbeton

Zunächst wurden die Kurzzeitversuche an den zylindrischen Proben (\emptyset 8 cm/ l = 14 cm) aus der ersten Serie des Basaltbetons (Proben-Nr.: A 105 ÷ A 143) im Probenalter von 90 Tagen bei Raumtemperatur durchgeführt, um die für die nachfolgenden Dauerstandsversuche notwendigen Spannungsniveaus (30, 50, 70 und 90 % der Kurzzeitfestigkeit) festlegen zu können.

Da für diesen hochfesten Beton keine Erfahrungen über den Einfluß unterschiedlicher Lasteinleitungssysteme und Maschinensteifigkeiten auf die Festigkeitswerte vorlagen, erfolgte die Bestimmung der Kurzzeitdruckfestigkeit der Zylinder mit Durchmesser 8 cm im Probenalter von 90 d mit zwei verschiedenen Prüfmaschinen: mit dem servohydraulischen Hochtemperaturprüfstand (HT-Prüfstand) und einer 600 kN-Würfelpresse.

Die entsprechenden Ergebnisse sind im oberen Teil der Tabelle 3 zusammen mit den Ergebnissen der an Zylindern (\emptyset 15 cm/l = 30 cm) und Würfeln ($15/15/15$ cm³) im Alter von 90 Tagen durchgeführten Güteprüfungen angegeben.

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, liefern die Druckprüfungen im servohydraulischen HT-Prüfstand aufgrund einer etwas geringeren Maschinensteifigkeit, vor allem aber wegen der relativ langen, quer zur Krafteinleitungsrichtung relativ biegeweichen Stempel etwas geringere Festigkeit als die entsprechenden Druckprüfungen in der 600 kN-Würfelpresse.

In diesem Zusammenhang ist jedoch auch von Interesse, wie die an den Zylindern mit Durchmesser 8 cm (8er Zylinder) ermittelten Festigkeiten mit den Festigkeiten der Zylinder mit 15 cm Durchmesser (15er Zylinder) korrelieren. Zur Berücksichtigung des Schlankheitseinflusses auf die Festigkeit kann die Beziehung nach Voellmy (siehe /5/) herangezogen werden:

$$\beta = \frac{2 + H/d}{3} \cdot \beta' \quad (3)$$

mit

β = schlankheitsunabhängige Festigkeit

β' = gemessene schlankheitsabhängige Festigkeit

h = Probenhöhe

d = Probendurchmesser

Entsprechend der Gleichung (3) müßten aus den mit 8er Zylindern gemessenen Festigkeiten $\beta'_{c, \emptyset 8}$ 1,25fache Festigkeiten für 15er Zylinder $\beta_{c, \emptyset 15}$ resultieren.

$$\beta_{c, \emptyset 15} = 1,25 \cdot \beta'_{c, \emptyset 8} \quad (4)$$

Die mit der 600 kN-Würfelpresse an 8er Zylindern gemessenen Festigkeiten würden damit

$$\beta_{c, \emptyset 15} = 72,5 \text{ N/mm}^2$$

entsprechen und die mit dem servohydraulischen HT-Prüfstand an 8er Zylindern ermittelten Festigkeiten würden

Tabelle 3: Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten des Basaltbetons bei Raumtemperatur (Referenzversuche, Lagerung der Proben bis zum Versuchsbeginn unter Wasser bei 20 °C)

Probekörper Nr.	Art der Proben	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Rohdichte [kg/dm ³]	Bemerkungen
A 141 A 142 A 143	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	71 70 72	41,7 47,6 44,4	2,54 2,54 2,54	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 71$	44,6	2,54	Probenalter: 90 d
A 105 A 116 A 127	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	56 61 57	- - -	2,54 2,53 2,53	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: TONI 600 kN
		$\bar{x} = 58$	-	2,53	Probenalter: 90 d
A 115 A 104 A 126	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	56,5 53,5 50,7	45,5 49,7 40,6	- - -	Prüfung mit servohy- draulischer Hochtempe- raturprüfmaschine: Schenck, 400 kN
		$\bar{x} = 53,6$	45,3	-	Probenalter: 91 d
AW 107 AW 108 AW 109	Würfel 15/15/15 cm ³	73 69 77	- - -	2,55 2,54 2,55	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 73$	-	2,55	Probenalter: 90 d
A 341 A 342 A 343	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	77 73 76	42,8 42,9 47,4	2,54 2,53 2,54	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 75$	44,4	2,54	Probenalter: 95 d
A 303 A 319 A 331	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	74 79 75	- - -	2,56 2,54 2,54	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: TONI 600 kN, Probenalter 620 d
		$\bar{x} = 76$	-	2,55	
A 315 A 325 A 336	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	80 79 77	48,5 50,3 49,5	2,55 2,56 2,54	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: TONI 600 kN
		$\bar{x} = 79$	49,4	2,55	Probenalter: 660 d
AW 307 AW 308 AW 309	Würfel 15/15/15 cm ³	80 82 78	- - -	2,57 2,55 2,57	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 80$	-	2,56	Probenalter: 90 d
AW 310 AW 311 AW 312	Würfel 15/15/15 cm ³	89 81 78	- - -	2,51 2,51 2,51	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 83$	-	2,51	Probenalter: 802 d

$$\beta_{c,\emptyset 15} = 67,00 \text{ N/mm}^2$$

ergeben. Diese Werte weichen nur geringfügig von den tatsächlich gemessenen Werten von 71 N/mm² ab. Die mit dem servohydraulischen HT-Prüfstand gemessenen Werte liegen nur um ca. 5 % unter diesem Wert.

Da die Belastungssysteme des Hochtemperaturkriechprüfstandes hinsichtlich des Steifigkeitsverhaltens ähnlich wie der servohydraulische HT-Prüfstand einzuschätzen sind, wurde entsprechend den vorangestellten Überlegungen in den Dauerstandsversuchen für das Belastungsniveau

$$100 \% \cong 53,6 \text{ N/mm}^2$$

gesetzt. Entsprechend ergeben sich die in Tabelle 4 angegebenen Belastungsniveaus mit den dazugehörigen Betonspannungen, pneumatischen Drücken und Pressenkräften.

Tabelle 4: Belastungsniveaus, Betonspannungen, pneumatische Drücke und Pressenkräfte bei den Dauerstandsversuchen (Basaltbeton)

Belastungsniveau [%]	Betonspannung [N/mm ²]	pneumatischer Druck [bar]	Pressenkraft [kN]
100	53,6	89,3	269,4
90	48,2	80,4	242,5
80	42,9	71,5	215,6
70	37,5	62,5	188,6
60	32,2	53,6	161,7
50	26,8	44,7	134,7
30	16,1	26,8	80,8

Aus den in Tabelle 3 angegebenen Ergebnissen der E-Modulmessungen sowie aus weiteren E-Modulbestimmungen mit dem Hochtemperaturkriechprüfstand, bei denen gleiche Werte ermittelt wurden, kann gefolgert werden, daß die Betonverformungen keinem Prüfmaschineneinfluß unterliegen, solange die Proben im elastischen Bereich beansprucht werden. Gleichzeitig liefern die Ergebnisse einen Hinweis auf die einwandfreie Funktion der Verformungsmeßsysteme.

Die Ergebnisse der Rohdichtebestimmungen legen den Schluß nahe, daß die Verdichtung bei der Herstellung der 15er Zylinder etwas günstiger war als bei der Herstellung der 8er Zylinder.

Für die zweite Probekörperserie des Basaltbetons (Proben A 301 - A 336) erfolgte die Durchführung der Güteprüfungen an den 15er Zylindern und an den Würfeln ebenfalls nach 90tägiger Wasserlagerung. Die entsprechenden Ergebnisse sind zusammen mit an den 8er Zylindern ermittelten Werten im unteren Teil der Tabelle 3 angegeben.

Die Prüfung der 8er Zylinder erfolgte versehentlich nicht wie geplant im Alter von 90 d, sondern erst nach Beendigung der Dauerstandsversuche im Probenalter von 620 d bzw. 660 d. Sowohl die Zylinder A 303, A 319 und A 331 als auch die Zylinder A 315, A 325 und A 336 mußten dabei in der 600 kN-Prüfmaschine abgedrückt werden, da bei der ersten Prüfung der Proben A 315 und A 325 in der 400 kN-Prüfmaschine auch bei Aufbringen der maximalen Prüflast kein Probenbruch eintrat.

Ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Probenserien zeigt, daß die zweite Serie sowohl bei den Würfel- als auch bei den Zylinderfestigkeiten (Proben AW 307 - AW 309 bzw. A 341 - A 343) um 5 bis 10 % höhere Werte aufweist als die erste Serie (Proben AW 107 - A 109 bzw. A 141 - A 143). Zwischen den Festigkeiten der 8er und der 15er Zylinder besteht bei der zweiten Betonserie kein so starker Unterschied wie bei der zuerst geprüften Betonserie. Eine Ursache dafür könnte die längere Hydratationsdauer der 8er Zylinder der zweiten Serie (620 d) gegenüber den 15er Zylindern sein. Maßgeblich für die hohe Festigkeit der 8er Zylinder der zweiten Betonserie dürfte sich jedoch auch die höhere Rohdichte dieser Proben aufgrund der besseren Verdichtungswilligkeit des Frischbetons ausgewirkt haben (vgl. /1/).

Als Belastungsniveaus wurden bei den Dauerstandsversuchen mit Proben aus der zweiten Betoniercharge die gleichen Werte herangezogen wie bei den Proben aus der ersten Betoniercharge (vgl. Tabelle 4). Da bei den Proben aus der zweiten Betoniercharge ohnehin nur niedrigere Belastungsniveaus angewandt wurden (bei denen alle Proben die maximale Standzeit von 30 d

erreichten, s. unten), waren daraus auch keine grundlegenden Änderungen des Gesamtbildes über die Dauerstandsfestigkeit zu erwarten.

4.1.2 Rheinkiesbeton

Der Rheinkiesbeton wurde den gleichen Prüfungen unterworfen wie der Basaltbeton. Im Probenalter von 90 d wurden die Güteprüfungen bei beiden Rheinkiesbetonserien an Zylindern (\emptyset 15 cm, l = 30 cm) und an Würfeln (15 cm x 15 cm x 15 cm) durchgeführt. Die Festigkeits-, E-Modul- und Rohdichtebestimmungen an den 8er Zylindern (\emptyset 8 cm, l = 24 cm) erfolgte jeweils zu Beginn der Durchführung der Dauerstandsversuche im Probenalter von 335 d (erste Betonierserie) bzw. im Probenalter von 140 d (zweite Betonierserie), um die entsprechenden Referenzwerte zu erhalten.

Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Man erkennt, daß die Festigkeiten und E-Moduln der Proben in einem vergleichsweise engen Band liegen, jedoch übersteigen die Werte der ersten Serie immer geringfügig die entsprechenden Werte der zweiten Betonserie. Als Ursache dafür ist die etwas höhere Rohdichte bei den Proben der ersten Betonserie anzusehen.

Vergleicht man die Druckfestigkeiten der 8er Zylinder untereinander, so kann man feststellen, daß die mit der servohydraulischen 400 kN-Prüfmaschine ermittelten Werte bei beiden Betonserien etwas geringer ausfallen als die Werte, die mit der etwas steiferen 600 kN-Prüfmaschine ermittelt wurden.

Aufgrund ihrer längeren Hydrationsdauer weisen die 8er Zylinder (140 d bzw. 335 d) fast die gleiche Festigkeit auf wie die 15er Zylinder, die nur 90 d hydratisiert wurden; d.h. die im Vergleich zu den 15er Zylindern geringere Schlankheit der 8er Zylinder wirkt sich hier festigkeitsmäßig kaum aus, weil infolge der längeren Hydrationsdauer der 8er Zylinder der festigkeitsmindernde Einfluß der höheren Schlankheit durch den Festigkeitszuwachs infolge der verlängerten Hydrationsdauer kompensiert wird. Dies steht auch im Einklang mit den Beobachtungen, die schon mit den Proben der zweiten Serie des Basaltbetons gemacht wurden.

Tabelle 5: Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten des Rheinkiesbetons bei Raumtemperatur (Referenzversuche, Lagerung der Proben bis zum Versuchsbeginn unter Wasser bei 20 °C)

Probekörper Nr.	Art der Proben	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Rohdichte [kg/dm ³]	Bemerkungen
R 141 R 142 R 143	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	67 66 68	37,6 35,4 34,3	2,44 2,44 2,44	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 67$	35,8	2,44	Probenalter: 90 d
R 115 R 117 R 129	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	68 70 67	- - -	2,42 2,42 2,42	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: TONI 600 kN
		$\bar{x} = 68$	-	2,42	Probenalter: 335 d
R 111 R 131 R 112	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	68 64 64	40,2 38,7 40,5	- - -	Prüfung mit servohy- draulischer Prüfmaschi- ne Schenck, 400 kN
		$\bar{x} = 65$	39,8	-	Probenalter: 334 d
RW 107 RW 108 RW 109	Würfel 15/15/15	71 73 69	- - -	2,44 2,43 2,45	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 71$	-	2,44	Probenalter: 93 d
R 341 R 342 R 343	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	67 65 66	34,7 31,1 33,5	2,43 2,43 2,43	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 66$	33,1	2,43	Probenalter: 90 d
R 305 R 316 R 327	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	66 65 65	- - -	2,41 2,42 2,42	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: TONI 6 00 kN
		$\bar{x} = 65$	-	2,42	Probenalter: 140 d
R 323 R 335 R 334	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	67 63 62	36,7 37,6 36,6	- - -	Prüfung mit servohy- draulischer Prüfmaschi- ne: Schenck, 400 kN
		$\bar{x} = 64$	37,0	-	Probenalter: 141 d
RW 307 RW 308 RW 309	Würfel 15/15/15	65 69 67	- - -	2,44 2,44 2,45	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 67$	-	2,44	Probenalter: 90 d
RW 310 RW 311 RW 312	Würfel 15/15/15	73 78 70	- - -	2,43 2,42 2,42	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN
		$\bar{x} = 74$	-	2,42	Probenalter: 581 d

Die Vermutung, daß infolge der verlängerten Hydratationsdauer eine Verfestigung des Betons eintritt, wird auch dadurch gestützt, daß die E-Moduln der länger hydratisierten 8er Zylinder ebenfalls die E-Moduln der 15er Zylinder deutlich übersteigen. Außerdem ist auch ein Anstieg der Würfelfestigkeiten im Lagerungszeitraum von 90 d bis 580 d um ca. 10 % zu verzeichnen (vgl. Tabelle 5). Auch dieses steht im Einklang mit den Beobachtungen, die mit Basaltbeton gemacht worden waren.

Stellt man den Festigkeiten der Basaltbetonserien die entsprechenden Werte der Rheinkiesbetonserien gegenüber, so läßt sich feststellen, daß der Basaltbeton bei vergleichbaren Hydratationszeiten erwartungsgemäß stets höhere Festigkeiten aufweist.

Bei den Dauerstandsversuchen wären als Belastungsniveaus "100 %" die entsprechenden Kurzzeitdruckfestigkeiten gemäß Tabelle 5 (65 bzw. 64 N/mm²) anzusetzen.

Auf ausdrücklichen Wunsch von HRB sollte jedoch die Nennfestigkeit 51 N/mm² als 100 % herangezogen werden. Dementsprechend wurde mit den in Tabelle 6 angegebenen Betonspannungen, pneumatischen Drücken bzw. Pressenkräften bei den Dauerstandsversuchen gearbeitet.

Tabelle 6: Belastungsniveaus, Betonspannungen, pneumatische Drücke und Pressenkräfte bei den Dauerstandsversuchen (Rheinkiesbeton)

Belastungsniveau [%]	Betonspannung [N/mm ²]	pneumatischer Druck [bar]	Pressenkraft [kN]
100	51	85	256,4
90	45,9	76,5	230,7
70	35,7	59,5	179,5
50	25,5	42,5	128,2
30	15,3	25,5	76,9

4.2 Dauerstandsversuche

4.2.1 Basaltbeton

Die Versuche wurden mit der Bestimmung der Standzeit von hochbelasteten Proben (90 % der Kurzzeitfestigkeit) im servohydraulischen HT-Prüfstand begonnen, wobei zunächst auf eine gleichzeitige Aufheizung der Proben verzichtet wurde (Versuche 90 %/20 °C), weil dadurch eine ständige visuelle Beobachtung der Proben möglich war und so erste grundsätzliche Erfahrungen über das Bruchverhalten der Proben gewonnen werden konnten. Gleichzeitig dienten diese Versuche dazu, etwaige Standzeiten bei höheren Temperaturen abzuschätzen. Das Probenalter betrug hier 90 d.

Parallel dazu wurde im Hochtemperaturkriechprüfstand mit Versuchen bei relativ niedrigen Belastungsniveaus (60 %) begonnen. Diese Versuche dienten im wesentlichen dazu, die Prüfanlage und die Verformungsmeßsysteme sowie die Meßdatenerfassungsanlage für die Verformungen und Temperaturen unter den vorliegenden speziellen Prüfbedingungen zu testen. Gleichzeitig sollten aber auch schon Erkenntnisse darüber gewonnen werden, bei welchen Belastungsniveaus und Temperaturen kein Versagen der Proben innerhalb von 30 Tagen zu erwarten ist.

Sowohl die Vorversuche im servohydraulischen HT-Prüfstand als auch im Hochtemperaturkriechprüfstand verliefen erfolgreich und ohne Störungen. Die entsprechenden Ergebnisse konnten deshalb für die weiteren Versuche bzw. Versuchsplanungen ohne Einschränkungen herangezogen werden. Sie sind zusammen mit den Ergebnissen der nachfolgenden Versuche in den Tabellen 7 und 8 sowie in den Bildern 5 und 6 zusammenfassend dargestellt.

Die mit 90 % belasteten Proben zeigten sehr unterschiedliche Standzeiten. Zwei Proben versagten bei 18,2 bzw. 67 min; bei zwei Proben wurden die Versuche nach 5 h 10 min bzw. nach 68 h ohne Bruch der Proben abgebrochen. Die Streuungen in den Standzeiten sind im wesentlichen mit Exemplarstreuung in den Festigkeiten der einzelnen Proben zu erklären.

Tabelle 7: Versuche, bei denen Probekörperversagen unter Dauerstandsbelastung auftrat

Probekörper Bezeichnung	Belastungsniveau Prüftemperatur	Versagens- temperatur	Standzeit	Bemerkungen
A 101 A 102 A 112 A 123	90 %/20 °C	20 °C	18,2 min > 68 h *) 67,5 min > 310 min *)	Prüfung in der servohydraulischen Hochtemperatur- Prüfanlage
A 103 A 114 A 125	90 %/200 °C	42 °C 35 °C 27 °C	12,8 min 15,7 min 5,5 min	Prüfung in der servohydraulischen Hochtemperatur- Prüfanlage
A 108 A 119 A 130	80 %/200 °C	- **) 96,7 °C 78,0 °C	158,5 min 382 min 224 min	Prüfung in der servohydraulischen Hochtemperatur- Prüfanlage
A 106	80 %/70 °C		Prüfung in der servohydraulischen Hochtemperatur-Prüfanlage. Nach einer Standzeit von ca. 12 d auf 200 °C erwärmt, nach ca. 1 d auf 70 °C abgekühlt, Bruch in der Ab- kühlphase.	

*) Die Versuche wurden nach Ablauf der oben angegebenen Standzeit ohne Bruch der Proben abgebrochen.

**) Die Temperatur wurde versehentlich nicht gemessen.

Die mit 60 % und 200 °C belasteten Proben versagten nicht innerhalb von 30 Tagen und zeigten trotz beachtlicher Kriechverformungen (größenordnungsmäßig 4,5 ‰) noch relativ hohe Restfestigkeiten (51,7; 51,7 bzw. 49,3 N/mm², entsprechend im Mittel 95 % der Ausgangsfestigkeit). Aufgrund dieser Versuchsergebnisse wurden die Untersuchungen im Hochtemperaturkriechprüfstand mit der Prüfung der mit 70 % und 200 °C belastenden Proben fortgeführt. Bei Versuchsbeginn waren diese Proben 174 d alt.

Anschließend wurden die mit 70 % und 120 °C zu belastenden Proben geprüft. Sowohl die mit 200 °C als auch die mit 120 °C thermisch belasteten Proben zeigten kein Versagen innerhalb der Standzeit von 30 Tagen. Die Festfestigkeiten dieser Proben waren ebenfalls, trotz etwas stärkerer Kriechverformungen als die mit 60 % belasteten Proben, noch relativ hoch (vgl. Tabelle 8):

- 70 %/200 °C: 45,6; 40,8 bzw. 44,4 N/mm²
 $\hat{=}$ im Mittel 81,3 % der Ausgangsfestigkeit;
- 70 %/120 °C: 57,1; 58,5 bzw. 57,1 N/mm²
 $\hat{=}$ im Mittel 107,4 % der Ausgangsfestigkeit.

Die Untersuchungen der Dauerstandsfestigkeiten bei den höheren Belastungsniveaus wurden im servohydraulischen HT-Prüfstand weitergeführt. Sowohl die mit 90 % als auch die mit 80 % belasteten Proben versagten während des Aufheizens auf die angestrebte Temperaturhöhe von 200 °C.

Weitere Prüfungen bei Belastungsgraden von 90 % erschienen nicht mehr sinnvoll, da alle Proben schon nach relativ kurzer Standzeit (< 15,7 min) und bei relativ niedrigen Temperaturen (< 42 °C) versagten.

Die mit 80 % belasteten Proben zeigten demgegenüber schon deutlich höhere Standzeiten, und die Versagenstemperaturen lagen, zumindest bei zwei Proben, oberhalb von 70 °C.

Es wurde daher außerhalb des Versuchsprogramms ein weiterer Versuch mit einem Belastungsniveau von 80 % und einer angestrebten Versuchstemperatur von 70 °C durchgeführt. Hier zeigte sich nach einer Standzeit von 12 Tagen und 2 h kein Bruch des Probekörpers. Daraufhin wurde die Temperatur mit

10 K/h auf 200 °C unter Aufrechterhaltung der Belastung erhöht. Nach einer Standzeit von 25 h 10 min bei 200 °C wurde der Probekörper wiederum mit ca. 10 K/h auf 70 °C abgekühlt. Nach Erreichen dieses Temperaturniveaus versagte der Probekörper schließlich nach einer Standzeit von 2 h 47 min.

Das Verhalten dieses Probekörpers macht deutlich, daß die Dauerstandsfestigkeit bei hohen Temperaturen nicht allein von der absoluten Temperaturhöhe, sondern auch von dem zeitlichen Weg, auf dem die Temperatur erreicht wird, abhängt. Es ist zu vermuten, daß der Beton im Reaktor deutlich höhere Dauerstandsfestigkeiten zeigt, wenn beispielsweise nach jahrelangem, ungestörten Betrieb bei 70 °C eine störfallbedingte Temperaturerhöhung eintritt. Es ist zu empfehlen, diesen Aspekt in einem ergänzenden Versuchsprogramm eingehender zu untersuchen.

Bei allen Proben, die nicht innerhalb einer Standzeit von 30 d versagten, wurden nach Abkühlung der Proben unter Last jeweils der E-Modul und die Restfestigkeit bestimmt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Außerdem enthält die Tabelle noch die Restfestigkeiten und E-Moduln, die mit sehr geringer Belastung (4 %) bzw. unbelastet (0 %) aufgeheizt worden waren. Diese zusätzlich in das Programm aufgenommenen Versuche dienten der Ermittlung der thermischen Ausdehnung unter den angewandten spezifischen Versuchsbedingungen. Diese Daten müssen zur Verfügung stehen, um die während der Dauerstandsversuche ermittelten Verformungsdaten weiter auswerten zu können.

Die Prozentangaben bei den Festigkeitswerten und E-Moduln in Tabelle 8 beziehen sich einheitlich auf das in Tabelle 4 angegebene Belastungsniveau ($100 \% \cong 53,6 \text{ N/mm}^2$). Dies vor allem deswegen, weil die Restfestigkeiten und E-Moduln einheitlich mit dem servohydraulischen 400 kN-Hochtemperaturprüfstand ermittelt worden waren.

Wegen des unterschiedlichen Probenalters bei der Durchführung der einzelnen Dauerstandsversuche und der möglichen Festigkeitssteigerungen während der Probenalterung (bei Lagerung unter Wasser und 20 °C) sind diese Prozentangaben sehr kritisch zu betrachten. Verläßlich sind die Prozentangaben eigentlich nur bei den in Tabelle 7 angegebenen Proben und bei den mit 60 % bei 200 °C getesteten Proben, da sie wie die Referenzproben ebenfalls im Alter von etwa 90 d geprüft worden waren.

Tabelle 8: Ergebnisse der Untersuchungen nach 30tägiger Temperierung von Basaltbeton unter Last

Probekörper Nr.	Versuch	Restfestigkeit [N/mm ²]	Rest-E-Modul [kN/mm ²]	Restfestigkeit [%]	Rest-E-Modul [%]
A - 117 A - 118 A - 128	200°C/70% 30 d	45,6 40,8 44,4	19,4 24,7 21,6	85,1 76,1 82,8	42,8 54,5 47,7
		$\bar{x} = 43,6$	21,9	81,3	48,3
A - 113 A - 124 A - 135	200°C/60% 30 d	51,7 51,7 49,3	24,6 25,9 23,9	96,5 96,5 92,0	54,3 57,2 52,8
		$\bar{x} = 50,9$	24,8	95,0	54,7
A - 131 A - 132	200°C/50% 30 d	46,4 45,4 46,4	27,4 27,0 26,3	86,6 84,7 86,6	60,5 59,6 58,1
		$\bar{x} = 46,1$	26,9	86,1	59,4
A - 322 A - 316 A - 318	200°C/30% 30 d	50,3 48,1 49,1	33,5 33,7 33,1	93,8 89,7 91,6	74,0 74,4 73,1
		$\bar{x} = 49,2$	33,4	91,8	73,7
A - 110 A - 107 A - 120	120°C/70% 30 d	57,1 58,5 57,1	32,6 31,3 31,4	106,5 109,1 106,5	72,0 69,1 69,3
		$\bar{x} = 57,6$	31,8	107,4	70,2
A - 109 A - 111 A - 136	120°C/50% 30 d	55,5 59,3 54,1	27,5 31,3 29,6	103,5 110,6 100,9	60,7 69,1 65,3
		$\bar{x} = 56,3$	29,5	105,0	65,1
A - 327 A - 324 A - 335	70°C/4 % 120°C/4 % 200°C/4 % 30 d	56,7 56,5 49,7	31,6 29,0 25,0	105,8 105,4 92,7	69,8 64,0 55,2
		$\bar{x} = -$	-	-	-
A - 305 A - 304 A - 302	200°C/0 % 120°C/0 % 70°C/0 %	40,6 62,3 64,7	19,5 26,9 29,5	75,7 116,2 120,7	43,0 59,4 65,1
A - 309 A - 306 A - 310	200°C/0 % 120°C/0 % 70°C/0 %	48,1 66,5 62,9	20,0 27,1 30,8	89,7 124,1 117,4	44,2 59,8 68,0
A - 228 A - 233 A - 235	70°C/70 % 30 d	68 73 70	33,5 31,3 33,6	109,5 117,6 112,7	74,0 69,1 74,2
		$\bar{x} = 70$	32,8	112,7 *)	72,4 **)

*) 100 % \equiv 62,1 N/mm²

**) 100 % \equiv 45,3 kN/mm², bezogen auf 53,6 N/mm², da Referenzwerte aus der gleichen Betonierserie nicht vorlagen.

Alle anderen Proben weisen bei den Prüfungen jedoch wesentlich höhere Probenalter auf, so daß die aktuelle Vergleichsfestigkeit möglicherweise höher als $53,6 \text{ N/mm}^2$ war (vgl. auch Abschnitt 4.1). Um die Festigkeits- und E-Modulwerte überhaupt vergleichen zu können, wurden dennoch als Bezugswerte $53,6 \text{ N/mm}^2$ für die Festigkeiten bzw. $45,3 \text{ N/mm}^2$ die E-Moduln beibehalten, auch für die Auswertungen der zweiten Betonierserie.

Vergleicht man die Restfestigkeiten der unterschiedlich belasteten Proben untereinander (siehe Bild 5), so lassen sich die erzielten Ergebnisse am ehesten nach der Höhe der Temperaturbelastung eingruppierten: Die mit 70°C beanspruchten Proben weisen sowohl prozentual als auch absolut gesehen (vgl. Tabelle 8) die höchsten Restfestigkeiten auf. Demgegenüber etwas vermindert sind die Festigkeiten der mit 120°C beanspruchten Proben. Deutlich unterhalb der Referenzfestigkeit liegen die Werte der auf 200°C aufgeheizten Proben. Der Belastungsgrad scheint, selbst wenn man die Restfestigkeiten der unbelastet temperierten Proben mit hinzunimmt (vgl. Tabelle 8), von untergeordneter Bedeutung zu sein. Trotz der eingeschränkten Aussagefähigkeit der Prozentangaben läßt sich auch feststellen, daß die hier ermittelten Restfestigkeiten sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr gut mit den Ergebnissen der Dauertemperaturversuche korrespondieren (vgl. /6/). Nur bei den mit 200°C beanspruchten Proben ist eine leichte Tendenz zu beobachten, daß die Festigkeitsminderung mit dem Belastungsgrad zunimmt.

Die Proben reagieren hinsichtlich des elastischen Verhaltens sehr viel empfindlicher auf die thermischen Belastungen als hinsichtlich der Festigkeit. Wie aus Bild 6 hervorgeht (vgl. auch Tabelle 8), weisen alle Proben nach der erfolgten Hochtemperaturdauerstandsprüfung geringere E-Moduln auf als die bei 20°C geprüften Referenzproben.

Auch die Ergebnisse der E-Moduluntersuchungen lassen sich am ehesten nach der Höhe der Belastungstemperatur einordnen. Die bei 70°C geprüften Proben zeigen fast immer die höchsten E-Moduln, während die mit 200°C belasteten Proben meistens die niedrigsten Werte aufweisen. Es ist jedoch auch eine deutlichere Tendenz festzustellen, daß die E-Moduln vom Belastungsgrad abhängen. Die jeweils höchsten E-Moduln weisen Proben auf, die unter Aufrechterhaltung eines Belastungsgrades von 30 % temperiert wurden. Bei höheren Belastungen fällt der E-Modul mit zunehmendem Belastungsgrad wieder ab. Jedoch liegen die

bei dem höchsten Belastungsgrad (70 %) festgestellten E-Moduln noch deutlich über den Werten, die mit unbelastet aufgeheizten Proben erzielt wurden (vgl. Tabelle 8 und /6/).

Die starke Abnahme der Elastizität unbelastet aufgeheizter Proben beruht - wie bereits ausführlich in /6/ diskutiert wurde - hauptsächlich auf der Austrocknung des Zementsteins im Verlaufe der Temperierung. Infolge der Austrocknung schwindet der Zementstein sehr stark, gleichzeitig dehnen sich die Zuschläge während der Aufheizung aus, und es treten Risse insbesondere in der Kontaktzone zwischen Grobzuschlag und Feinmörtelmatrix auf. Die äußere mechanische Belastung während der Temperaturbeanspruchung überlagert sich mit den durch die thermische Unverträglichkeit der Komponenten entstehenden lokalen Spannungen, so daß andere räumliche Verteilungen der Risse auftreten als bei unbelasteter Aufheizung. Vereinfachend läßt sich sagen, daß derjenige Anteil der Mikrorisse verringert wird, bei denen die Reißflächen orthogonale Komponenten zur Belastungsrichtung besitzen.

Der E-Modul steigt so lange mit dem Belastungsgrad an, bis diese Belastung ausreicht, um die Reißentstehung in Richtung der Belastung vollständig zu verhindern. Nach /7/ ist damit zu rechnen, daß diese Reißentstehung bei Belastungshöhen von 20 bis 30 % der Kurzzeitbruchlast gerade unterbunden wird.

Nach Überschreiten eines bestimmten Belastungsniveaus entsteht in den anderen Raumrichtungen ein höheres Reißvolumen /8/. Infolgedessen wird die Struktur des Betons aufgelockert, und der E-Modul nimmt mit der Belastungshöhe wieder ab.

4.2.2 Rheinkiesbeton

Bei der Durchführung der Dauerstandsversuche mit Rheinkiesbeton konnte aufgrund der Erfahrungen, die bei den Untersuchungen des Basaltbetons gewonnen wurden, auf eine Reihe von Vorversuchen verzichtet werden. Da entsprechend den Wünschen des Auftraggebers die Belastungsniveaus auf die Nennfestigkeit ($100 \% \hat{=} 51 \text{ N/mm}^2$) zu beziehen waren und nicht auf die höhere gemessene 20°C -Kurzzeitfestigkeit (65 bzw. 64 N/mm^2 , vgl. auch Tabelle 5), war nur bei den mit 90% und 200°C zu belastenden Proben ein Versagen vor dem Ablauf einer Standzeit von 30 d zu erwarten. Deshalb wurden auch nur Proben

mit dieser hohen thermischen und mechanischen Belastung (alle drei Proben: 90 %/200 °C und orientierend eine Probe 90 %/70 °C) im servohydraulischen Prüfstand untersucht. Die Prüfung aller anderen Proben erfolgte in den pneumatischen Hochtemperatur-Kriechprüfständen.

Die Untersuchungen wurden mit den Prüfungen unter hoher mechanischer Belastung (200 °C/90 %) im servohydraulischen Prüfstand und unter niedriger mechanischer Belastung (200 °C/30 %) im Hochtemperaturprüfstand begonnen. Die Proben waren zu Beginn der Prüfungen ca. 120 d alt.

Die Ergebnisse der Dauerstandsversuche sind zusammenfassend in Tabelle 9 dargestellt. Außerdem enthält die Tabelle noch die Restfestigkeiten und E-Moduln von unbelastet temperierten Proben (200 °C/0 %). Diese zusätzlich in das Programm aufgenommenen Versuche dienten der Ermittlung der thermischen Ausdehnung unter den angewandten spezifischen Versuchsbedingungen.

Von den untersuchten Proben versagte nur Probe 332 innerhalb der geforderten Mindeststandzeit von 30 d. Bei ihr trat der Bruch 6,5 min nach Erreichen der Maximaltemperatur (200 °C) auf. Bei Probe 312 wurde zwar die Standzeit von 30 d erreicht, die Probe versagte jedoch, nachdem im heißen Zustand der E-Modul durch dreimaliges Be- und Entlasten bestimmt wurde, im Verlaufe der Wiederbelastung auf 45,9 N/mm² (\cong 90 %). Der Bruch trat bei 43,6 N/mm² ein.

Bei allen anderen Proben konnte die Restfestigkeit und der E-Modul nach dem Wiedererkalten bestimmt werden. Auch bei den Proben, die mit 30 %iger Belastung auf 200 °C aufgeheizt werden sollten, jedoch unplanmäßig durch einen Defekt der Steuerungsthermoelemente auf 550 °C aufgeheizt wurden.

Die in Tabelle 9 in Prozent angegebenen Festigkeiten und E-Moduln wurden einheitlich auf 64 N/mm² bzw. 37,0 kN/mm² bezogen, um eine gewisse Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen. Dieser Bezug erscheint auch zulässig, weil die beiden Betonserien nach den Ergebnissen der 90-Tage-Prüfungen hinsichtlich der Festigkeiten und E-Moduln vernachlässigbar geringe Unterschiede aufweisen. Ebenso wie beim Basaltbeton besitzen die Prozentangaben auch bei Rheinkiesbeton nur eine eingeschränkte Aussagekraft, weil bei der Durchführung der Dauerstandsversuche nicht alle Proben im gleichen Alter geprüft werden konnten.

Tabelle 9: Ergebnisse der Untersuchungen nach 30tägiger Temperierung von Rheinkiesbeton unter Last

Probekörper Nr.	Versuch	Restfestigkeit [N/mm ²]	Rest-E-Modul [kN/mm ²]	Restfestigkeit [%]	Rest-E-Modul [%]
R 332 R 308 R 312	200 °C 90 %	*) 56,7 ***)	- 30,4 -	- 98,6 -	- 82,2 -
		$\bar{x} = -$	-	-	-
R 110 R 114 R 135	120 °C 90 %	53,1 54,9 57,7	28,9 26,5 27,4	90,3 85,3 90,1	73,1 71,6 74,1
		$\bar{x} = 56,9$	27,6	88,9	74,6
R 330 R 311 R 320 R 336	70 °C 90 %	67,6 50,5 47,7 51,3	36,7 32,0 28,5 29,7	105,6 78,9 74,5 80,1	99,2 86,5 77,0 80,3
		$\bar{x} = 54,3$	31,7	84,8	85,7
R 307 R 313 R 314	200 °C 70 %	40,2 42,6 39,0	29,5 27,4 25,9	62,8 66,5 60,9	79,7 74,1 70,0
		$\bar{x} = 40,6$	27,6	63,4	74,6
R 303 R 331 R 309	120 °C 70 %	53,9 56,7 59,5	34,7 32,6 33,6	84,2 88,6 93,0	93,8 88,1 90,8
		$\bar{x} = 56,7$	33,6	88,6	90,8
R 321 R 322 R 324	70 °C 70 %	59,5 51,1 54,9	38,4 36,1 36,8	93,0 79,8 85,8	103,8 97,6 99,5
		$\bar{x} = 55,2$	37,1	86,3	100,3
R 326 R 318 R 315	200 °C 50 %	47,8 53,7 52,9	30,9 33,2 32,3	74,7 83,9 82,7	83,5 89,7 87,3
		$\bar{x} = 51,5$	32,1	80,5	86,8
R 304 R 329 R 319	120 °C 50 %	67,6 65,7 65,5	32,6 33,7 32,0	105,6 102,7 102,3	88,1 91,1 86,5
		$\bar{x} = 66,3$	32,8	103,6	88,6
R 301 R 333 R 325	200 °C 30 % **)	24,4 21,6 23,6	8,3 8,5 9,7	38,1 33,8 36,9	22,4 23,0 26,2
		$\bar{x} = 23,2$	8,8	36,3	23,9
R 102 R 107 R 113	200 °C 0 %	45,8 48,9 48,7	17,3 22,1 17,5	71,6 76,4 76,1	46,8 59,7 47,3
		$\bar{x} = 47,8$	19,0	74,7	51,3

*) Probe R 332 6,5 min nach Erreichen der max. Temperatur gebrochen.

**) unplanmäßig auf 550 °C aufgeheizt.

***) Probe wurde nach 30 d bei 200 °C dreimal be- und entlastet ($0 < \sigma < 24 \text{ N/mm}^2$) beim Wiederbelasten im heißen Zustand auf 90 % ($\approx 45,9 \text{ N/mm}^2$) trat bei $\sigma = 43,6 \text{ N/mm}^2$ Bruch ein.

****) Dauerstandsuntersuchung erfolgte in servohydraulischem 400 kN-Prüfstand.

Vergleicht man die Restfestigkeiten der unterschiedlichen Rheinkiesproben untereinander (vgl. Bild 7, in das zu Vergleichszwecken auch die bei den E-Modulversuchen /9/ ermittelten Werte eingezeichnet wurden), so läßt sich keine eindeutige Eingruppierung der Ergebnisse nach der Höhe der Versuchstemperaturen wie beim Basaltbeton durchführen. Die geringen Unterschiede zwischen den Restfestigkeiten der mit 70 °C temperierten Proben und der Restfestigkeit der 120 °C-Proben liegen eher im Rahmen versuchsbedingter Streuungen. Dieses Ergebnis stimmt auch mit den Ergebnissen der Dauertemperaturversuche überein. Auch bei den Dauertemperaturversuchen zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen den 70 °C- und den 120 °C-Proben. Bei beiden Versuchstemperaturen zeigten die Proben noch Festigkeiten, die über der Referenzfestigkeit lagen (vgl. /6/). Die mit 200 °C mechanisch unbelastet temperierten Proben zeigten zwar etwas geringere Festigkeiten als die 70 °C- und 120 °C-Proben, jedoch wiesen sie nach 28tägiger Temperierung immer noch die Referenzfestigkeit (20 °C-Proben) auf.

Bei Temperierung unter Belastung geht die Restfestigkeit bei fast allen Proben unter die Ausgangsfestigkeit zurück. Dieser Festigkeitsrückgang ist besonders stark ausgeprägt bei den mit 70 % bzw. 50 % belasteten 200 °C-Proben. Es herrscht jedoch nur eine geringe Tendenz vor, daß sich die Festigkeitsabnahme mit dem Belastungsgrad und der Versuchstemperatur vergrößert.

Der starke Festigkeitsabfall der mit 70 % und 200 °C belasteten Proben ist möglicherweise darauf zurückzuführen, daß die Proben im Zeitraum von der Abkühlung bis zur Festigkeitsprüfung Feuchtigkeit aufnehmen konnten.

Hinsichtlich ihres elastischen Verhaltens unterscheiden sich die bei unterschiedlichen Bedingungen temperierten Dauerstandsproben geringer als hinsichtlich ihrer Festigkeiten (vgl. Bilder 7 und 8). Alle E-Modulwerte liegen in einem schmalen Band. Jedoch weisen die mit 70 °C temperierten Proben bei vergleichbaren Belastungsgraden jeweils die höchsten E-Moduln und die mit 200 °C belasteten Proben die niedrigsten E-Moduln auf.

Im Vergleich zum Basaltbeton fällt die Abnahme der E-Moduln mit dem Belastungsgrad - auch unter Einschluß der Ergebnisse aus den E-Modulversuchen /9/ (mit 30 % belastete Proben) - beim Rheinkiesbeton sehr viel geringer aus.

Die größten Unterschiede in den E-Moduln ergeben sich zwischen den unbelastet aufgeheizten Proben und den belastet aufgeheizten Proben (vgl. /6/). So zeigen beispielsweise die mit 200 °C unbelastet aufgeheizten Proben (vgl. Tabelle 9) einen Rückgang des E-Moduls auf 51,3 % des Ausgangswertes, der vergleichbar ist mit den unbelastet aufgeheizten Dauertemperaturproben (54,6 %), während die belastet aufgeheizten Proben bei gleicher Temperierung immer noch ca. 75 bis 87 % des Referenzwertes aufweisen.

Diese Unterschiede beruhen - wie bereits in Abschn. 4.2.1 ausführlich diskutiert wurde - vor allem darauf, daß die Mikrorißbildung während der Temperierung durch die angreifende äußere Belastung beeinflusst wird. Insbesondere wird die Rißbildung mit Rißflächen orthogonal zur angreifenden äußeren Belastung nahezu verhindert.

4.3 Betonverformungen während der Dauerstandsbelastung

Bei der Durchführung der Dauerstandsversuche wurden - über den Auftragsrahmen hinausgehend und unter Einsatz von Mitteln des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig - alle Verformungen gemessen und registriert. Eine vollständige Auswertung aller Verformungsdaten konnte jedoch wegen fehlender finanzieller Mittel nicht durchgeführt werden.

In den folgenden Bildern 9 bis 12 sind daher nur beispielhaft Auswertungen der Verformungen des Basaltbetons während der Aufheizphase dargestellt. Bild 9 zeigt die thermische Ausdehnung der unbelastet mit 5 K/h aufgeheizten Proben. Die Kreuzchen geben die gemessenen Einzelwerte von sechs Proben wieder, wovon je zwei Proben auf 70 °C, 120 °C bzw. 200 °C aufgeheizt worden waren (vgl. Tabelle 8). Die durchgezogene Linie gibt den linearen Ausgleich der Meßpunkte mit Exponentialsplines wieder.

Bild 10 zeigt die instationären Kriechverformungen $\epsilon_{cr \text{ inst}}$, die aus den gemessenen Gesamtverformungen ϵ_{tot} , der thermischen Ausdehnung ϵ_{th} (aus Bild 9) und der Anfangsverformung zu Beginn der Belastung bei Raumtemperatur ϵ_{ej} gemäß der folgenden Gleichung

$$\epsilon_{cr\ inst} = \epsilon_{tot} - \epsilon_{el} - \epsilon_{th} \quad (5)$$

berechnet wurden (vgl. /10/). Die Punkte in Bild 10, die die Verformungen bei einem bestimmten Belastungsniveau (α) repräsentieren, geben dabei das Verhalten von wenigstens je drei Probekörpern wieder; bei den Belastungsgraden 50 % und 70 % sogar von sechs bzw. neun Probekörpern.

Auch diese errechneten Werte wurden analytisch ausgeglichen und durch Exponentialsplines approximiert. Die ermittelten Ausgleichsfunktionen sind in Bild 11 zusammengestellt.

Mit Hilfe der Ausgleichsfunktionen für die thermische Ausdehnung und für die instationären Kriechverformungen sowie den Mittelwerten der Anfangsverformungen (die bei kleinen Belastungsniveaus fast rein elastisch sind), lassen sich mit Gleichung (5) für alle möglichen Belastungsniveaus die zu erwartenden Gesamtverformungen berechnen. In Bild 12 sind die Berechnungsergebnisse für die in den Dauerstandsversuchen angewandten Belastungsgrade dargestellt. Diese Kurven geben den mittleren Verlauf der Betonverformungen wieder, die während der Versuche beobachtet wurden. Man erkennt, daß beim Durchlaufen des Temperaturbereichs 80 °C bis 140 °C insbesondere bei hohen Belastungen erhebliche Betonstauchungen auftreten. Gerade in diesem Temperaturbereich wird auch der größte Teil des physikalisch gebundenen Wassers aus dem Beton freigesetzt. Parallel dazu findet eine starke Umlagerung des im Zementgel eingelagerten Zwischenschichtwassers statt. Im Verlaufe der Wasserumlagerung besitzt der Zementstein eine hohe Kriechfähigkeit; gleichzeitig treten infolge der Entwässerungen Schwindverkürzungen des Zementsteins auf. Aus der Überlagerung der inneren und äußeren Kräfte sowie der hohen Verformungsfähigkeit resultieren die hohen Betonstauchungen.

Nach dem Abschluß der Betonentwässerung bei Temperaturen über 140 °C verliert der Beton den größten Teil seiner Kriechfähigkeit, der Zementstein wird fester, und die Betonstauchungen nehmen nur noch in geringerem Umfang zu. Daraus folgt, daß die kritischste Phase bei den Dauerstandsversuchen die Aufheizphase mit dem Durchlaufen des Temperaturbereichs 80 °C bis 140 °C darstellt. Bei sehr hohen Belastungsgraden (80 % bis 90 %) kann dieser Temperaturbereich zu etwas geringeren Temperaturen verschoben sein. Diese Folgerungen werden von den Beobachtungen während der Versuche voll gestützt.

Bei der Durchführung der Versuche mit Rheinkiesbeton wurden ähnliche Beobachtungen gemacht wie bei den Versuchen mit Basaltbeton.

5. Zusammenfassung

Berichtet wird über Dauerstandsversuche mit HTR-Betonprobekörpern bei erhöhten Temperaturen. Die Versuche wurden geplant und durchgeführt, da über das Dauerstandsverhalten von Beton, der ständig erhöhten Temperaturen ausgesetzt ist, bisher keine Untersuchungen vorlagen, die Kenntnis dieser Eigenschaft jedoch für eine zuverlässige Bemessung unabdingbar notwendig ist.

Den zu erwartenden unterschiedlichen Feuchtezuständen des Betons im Bauwerk wurde dadurch Rechnung getragen, daß die Proben sowohl im versiegelten Zustand (kein Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung) als auch im unversiegelten Zustand (Austrocknung möglich) geprüft werden. Die unversiegelten Versuche sowie die Herstellung der dafür erforderlichen Probekörper wurden im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt.

Für diese Versuche wurden aus Handhabungs- und Kostengründen (insbesondere im Hinblick auf die Versiegelungsgefäße) Zylinder \varnothing 80/240 mm verwendet. Jeweils drei Zylinder wurden je nach Temperaturstufe (70 °C, 120 °C, 200 °C) mit 30 % bis 90 % ihrer Kurzzeitbruchlast (Basaltbeton) bzw. Nennfestigkeit (Rheinkiesbeton) bei Raumtemperatur belastet. Dann erfolgte die Aufheizung unter Last mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/h. Während der gesamten Versuchsdauer wurden die Verformungen der Proben intervallweise gemessen. Nach einer Standzeit von 30 d ohne Probekörperversagen wurden die Versuche nach Abkühlung der Proben mit der Bestimmung des E-Moduls und der Festigkeit beendet.

Für die Durchführung der Versuche standen am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz ein Hochtemperatur-Kriechprüfstand, in dem jeweils drei Probekörper gleichzeitig bei hohen Temperaturen untersucht werden können, und eine servohydraulische Hochtemperatur-Prüfmaschine zur Verfügung. Beim

Hochtemperatur-Kriechprüfstand werden die Kräfte pneumatisch erzeugt und mit Hilfe von Druckkissen auf die Belastungsstempel übertragen. Das Einstellen der Belastungshöhe und das Nachjustieren erfolgen per Hand. Das Belastungssystem arbeitet unabhängig vom Stromversorgungsnetz und ist deshalb besonders für Langzeituntersuchungen geeignet, da kurzzeitige Stromabschaltungen oder -ausfälle die Versuchsdurchführung nicht wesentlich beeinträchtigen. In diesem Prüfstand wurden vorwiegend die Dauerstandsversuche mit niedrigen Belastungsniveaus durchgeführt, da hier die maximalen Standzeiten von 30 Tagen erwartet wurden. Bei hohen Belastungsniveaus ($> 70 \%$) wurde der Bruch im Verlaufe der Aufheizung erwartet. Diese Versuche wurden vorzugsweise in der servohydraulischen Hochtemperaturprüfmaschine durchgeführt, da diese Maschine einen einfacheren, weniger zeitaufwendigen Probenwechsel erlaubt.

Bei den Basaltbetonproben wurden zunächst die Güteprüfungen an Zylindern ($\emptyset 15 \text{ cm}/l = 30 \text{ cm}$) und Würfeln ($15/15/15 \text{ cm}^3$) im Alter von 90 Tagen und die Kurzzeitversuche an den zylindrischen Proben ($\emptyset 8 \text{ cm}/l = 24 \text{ cm}$) im Probenalter von 90 Tagen bei Raumtemperatur durchgeführt, um die für die nachfolgenden Dauerstandsversuche notwendigen Spannungsniveaus (30, 50, 70 und 90 % der Kurzzeitfestigkeit) festlegen zu können. Für die Dauerstandsversuche wurde entsprechend den Ergebnissen als Belastungsniveau $100 \% = 53,6 \text{ N/mm}^2$ gesetzt.

Für den Rheinkiesbeton wurden die gleichen Prüfungen durchgeführt. Bei den Dauerstandsversuchen wurde jedoch als Belastungsniveau 100 % nach Wünschen von HRB die Nennfestigkeit von 51 N/mm^2 gewählt.

Die Ergebnisse der Dauerstandsversuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Basaltbeton: Proben, die mit 90 % der Kurzzeitfestigkeit belastet worden waren, versagten wenige Minuten nach Beginn der Aufheizung. Die mit 80 % belasteten Proben versagten ebenfalls noch in der Aufheizphase, jedoch im allgemeinen erst nach Überschreiten der Probentemperatur von $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Alle Proben, deren Belastung max. 70 % der Kurzzeitfestigkeit betrug, zeigten innerhalb einer Standzeit von 30 Tagen kein Versagen. Die Restfestigkeit von belasteten, temperierten Proben lag bei Versuchstemperaturen von $70 \text{ }^\circ\text{C}$ und $120 \text{ }^\circ\text{C}$ in der Nähe der Ausgangsfestigkeit, während

die mit 200 °C temperierten Proben Festigkeitseinbußen zwischen 10 und 20 % zeigten. Nur bei den mit 200 °C temperierten Proben war die leichte Tendenz zu beobachten, daß der Festigkeitsabfall mit dem Belastungsgrad ansteigt. Die Rest-E-Moduln zeigten durchweg geringere Werte als im Ausgangszustand. Die E-Modul-Abnahme steigt im allgemeinen mit der Versuchstemperatur und dem Belastungsgrad. Die E-Moduln belastet aufgeheizter Proben liegen jedoch immer über den E-Moduln unbelastet aufgeheizter Proben. Im ungünstigsten Fall (200 °C, 70 %) wurde eine Abnahme auf die Hälfte der Ausgangs-E-Moduln beobachtet.

- Rheinkiesbeton: Beim Rheinkiesbeton versagte nur eine einzige Probe (200 °C/ 90 % der Nennfestigkeit = 71,7 % der Kurzzeitfestigkeit bei 20 °C) innerhalb der max. Standzeit von 30 Tagen. Die Restfestigkeit lag im allgemeinen zwischen 80 % und 100 % der Ausgangsfestigkeit. Es herrscht eine leichte Tendenz vor, daß sich die Festigkeitsabnahme mit dem Belastungsgrad und der Versuchstemperatur vergrößert. Der starke Festigkeitsabfall der mit 70 % und 200 °C belasteten Proben ist möglicherweise darauf zurückzuführen, daß die Proben im Zeitraum von der Abkühlung bis zur Festigkeitsprüfung durch fehlerhafte Lagerung Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen konnten. Ähnliche Tendenzen wie bei den Restfestigkeiten sind auch bei den E-Moduln zu beobachten, jedoch ist der E-Modulabfall im allgemeinen geringer ausgefallen als der Festigkeitsabfall.

Bei der Durchführung der Dauerstandsversuche wurden die Verformungen aller Probekörper gemessen und registriert. Eine vollständige Auswertung der Verformungsmeßergebnisse konnte wegen fehlender finanzieller Mittel nicht erfolgen. Im Bericht sind daher nur beispielhaft Auswertungen der Verformungen des Basaltbetons während der Aufheizphase aufgenommen worden. Im einzelnen sind die thermischen Ausdehnungen unbelastet aufgeheizter Proben und aus den Versuchsdaten einzelner Probekörper berechnete instationäre Kriechverformungen angegeben. Aus den Daten der einzelnen Probekörper wurden durch lineare Ausgleichsrechnung mittels Exponentialsplines Mittelwertkurven der thermischen Dehnung und des instationären Kriechens bestimmt. Mit Hilfe dieser Mittelwertkurven und den aus Messungen mit verschiedenen Proben erhaltenen gemittelten Anfangsverformungen bei Belastung unter Raumtemperatur lassen sich die Betonverformungen im Verlauf der Aufheizung in Abhängigkeit vom Belastungsgrad vollständig beschreiben. Aus den

Auswertungen folgt, daß die kritischste Phase bei den Dauerstandsversuchen die Aufheizphase mit dem Durchlaufen des Temperaturbereichs 80 °C bis 140 °C darstellt.

Um die Beurteilung des Dauerstandsverhaltens der beiden Reaktorbetone auf eine sichere Basis zu stellen, aber auch unnötige Sicherheitsreserven abzubauen zu können, sollten die Dauerstandsversuche noch um folgende Versuche ergänzt werden:

- Versuche zur Eingrenzung des Dauerstandsfestigkeitsbereichs (Versuche 85 % - 75 % bei 70, 120, 200 °C);
- Versuche zum Einfluß einer Vortemperierung auf die Dauerstandsfestigkeit (z. B. Vorbelastung von Proben mit 80, 70, 60, 50, 30 % für 14 Tage bei 70 °C bzw. 120 °C, dann Lasterhöhung auf 75 - 90 %, dann Temperaturerhöhung auf 120 °C bzw. 200 °C;
- gleichzeitige Bestimmung der entsprechenden Verformungen und Restfestigkeiten (wichtige Versuche für die Erklärung des Abbaus von Spannungsspitzen);
- Bestimmung der thermischen Ausdehnung (um die Verformungsanteile bei den Dauerstandsversuchen separieren zu können);
- Dauerstandsversuche an sog. "bauwerksfeuchtem" Beton;
- Ermittlung der Dauerstandsfestigkeit über 30 Tage hinaus bei 70 °C, 120 °C, 200 °C und Laststufen von 60 %, 70 % und 80 % der Kurzzeitfestigkeit.

Außerdem ist zu empfehlen, die bisher vorliegenden Verformungsdaten komplett auszuwerten, damit sie für die Bemessung und den rechnerischen Nachweis von Grenzzuständen zur Verfügung stehen.

7. Schrifttum

- /1/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juni 1984.
- /2/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauerstandsversuche, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juli 1984.
- /3/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung - Rheinkiesbeton, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juli 1985.
- /4/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauerstandsversuche, 2. Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juli 1985.
- /5/ Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Bd. 2: Beton, Mauerwerk. Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1974.
- /6/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauertemperaturversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, März 1986.
- /7/ Schneider, U.; Diederichs, U.; Ehm, C.; Hinrichsmeyer, K.: Hochtemperaturverhalten von Beton. Arbeitsbericht 1981 - 1983 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Teil II, Technische Universität Braunschweig, Mai 1983.
- /8/ Hinrichsmeyer, K.: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton. Dissertation, Technische Universität Braunschweig (in Vorbereitung), 1986.
- /9/ U. Diederichs: HTR-Betonversuche - E-Modulversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Mai 1986.
- /10/ Wydra, W.; Diederichs, U.; Schneider, U.: Deformation Behaviour and Creep Effects during a Heating-Cooling-Cycle. Proceedings of the 8th International Conference on "Structural Mechanics in Reactor Technology", Brussels (Belgium), 19. - 23. August 1985, Volume H, Paper H 5/6.

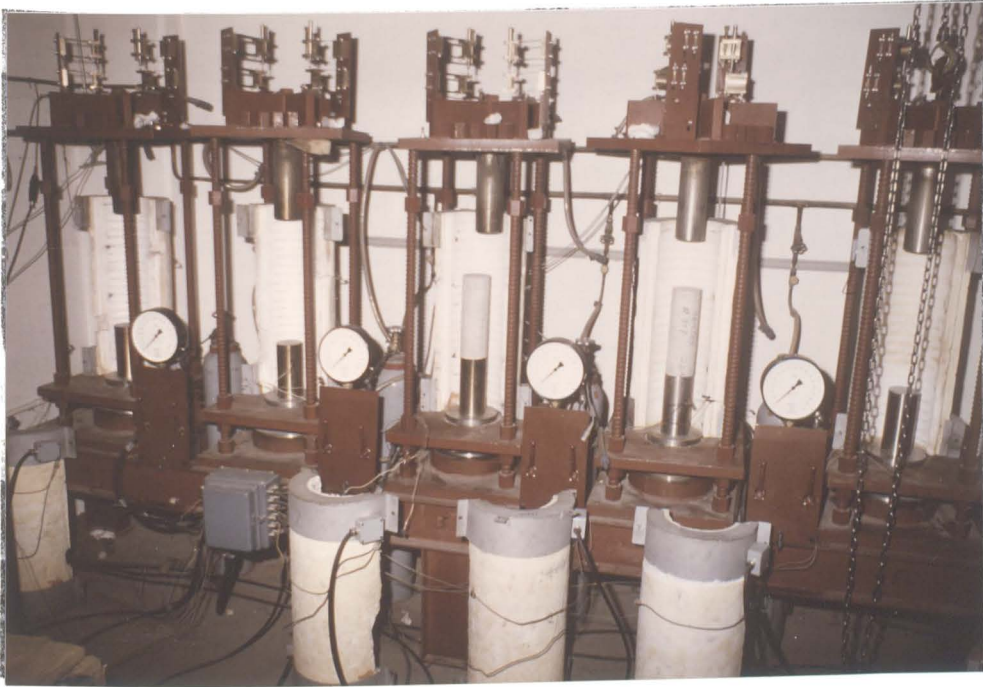


Bild 1: Hochtemperatur-Kriechprüfstand mit zum Einbau vorbereiteten Probekörpern

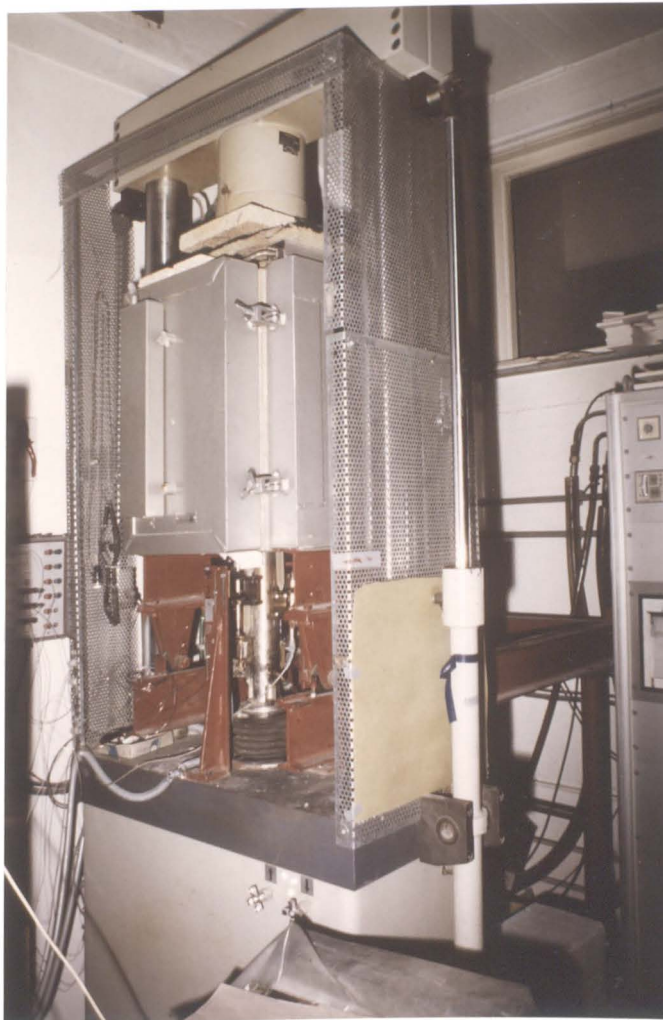


Bild 2: Servorhydraulische Hochtemperaturprüfmaschine mit zur Durchführung eines Dauerstandsversuchs geschlossenem Kammerofen

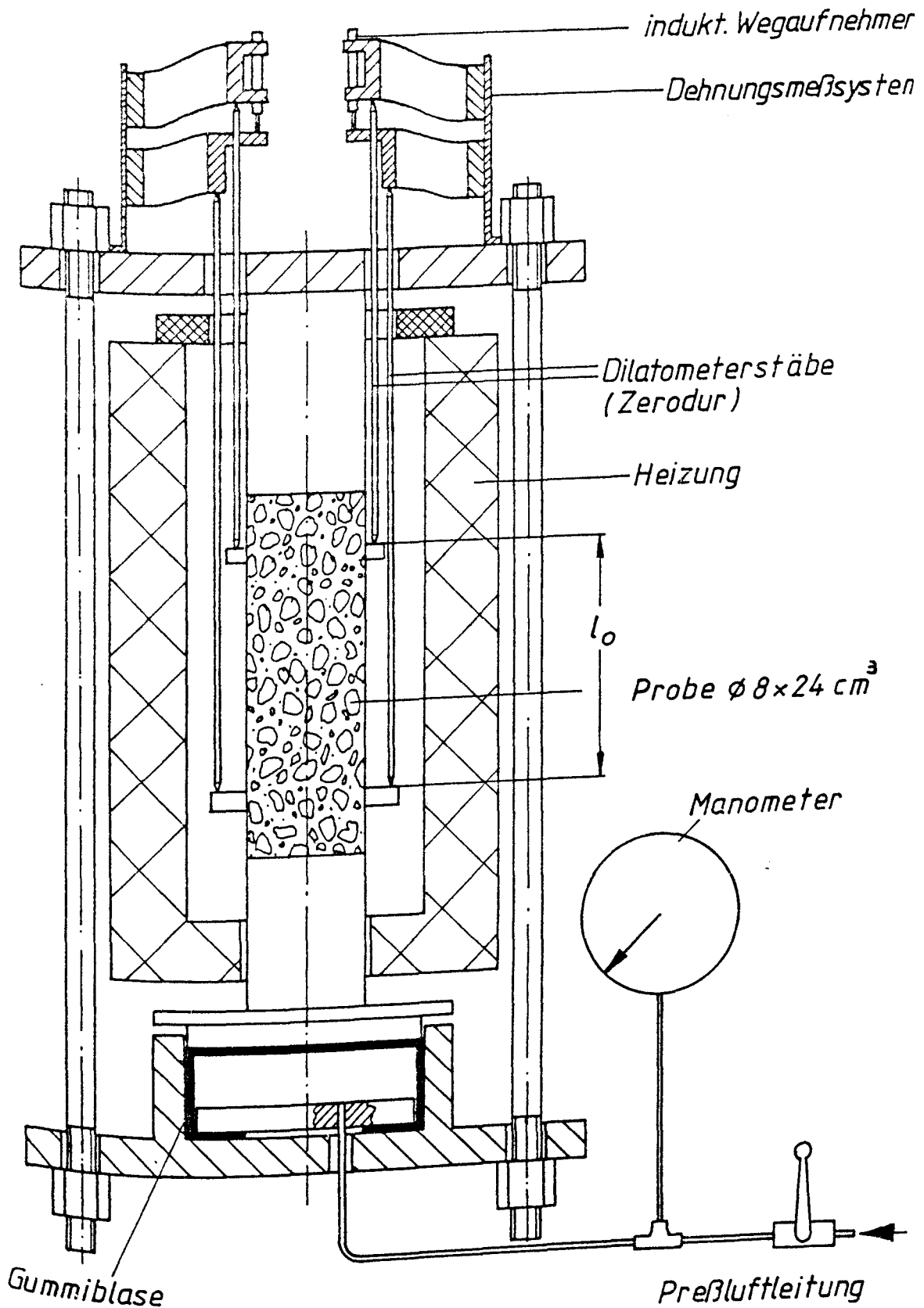


Bild 3: Schematische Darstellung des pneumatischen Belastungssystems und der Meß- und Heizungseinrichtungen des Hochtemperatur-Kriechprüfstands

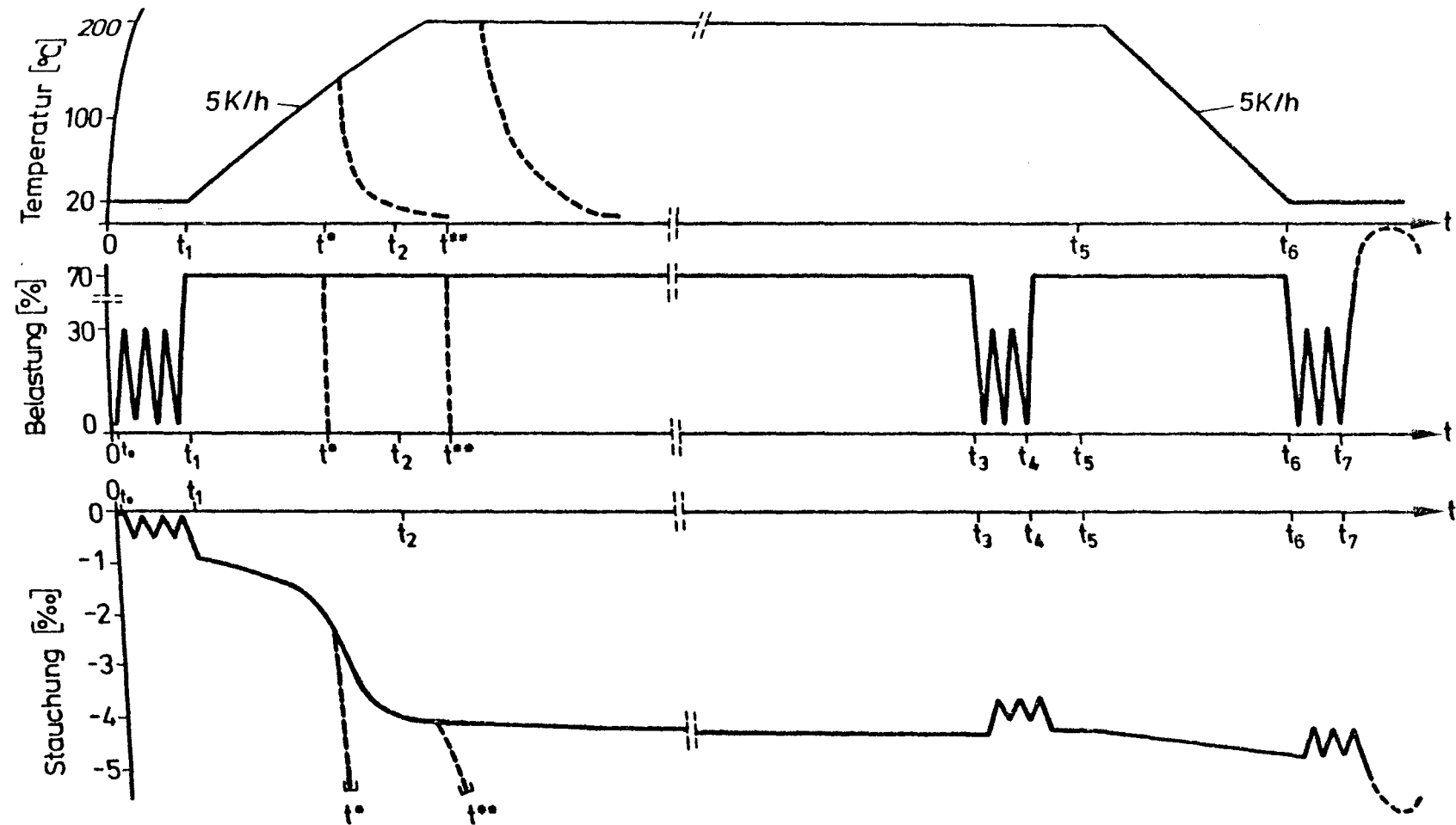


Bild 4: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Dauerstandsfestigkeit bei hohen Temperaturen

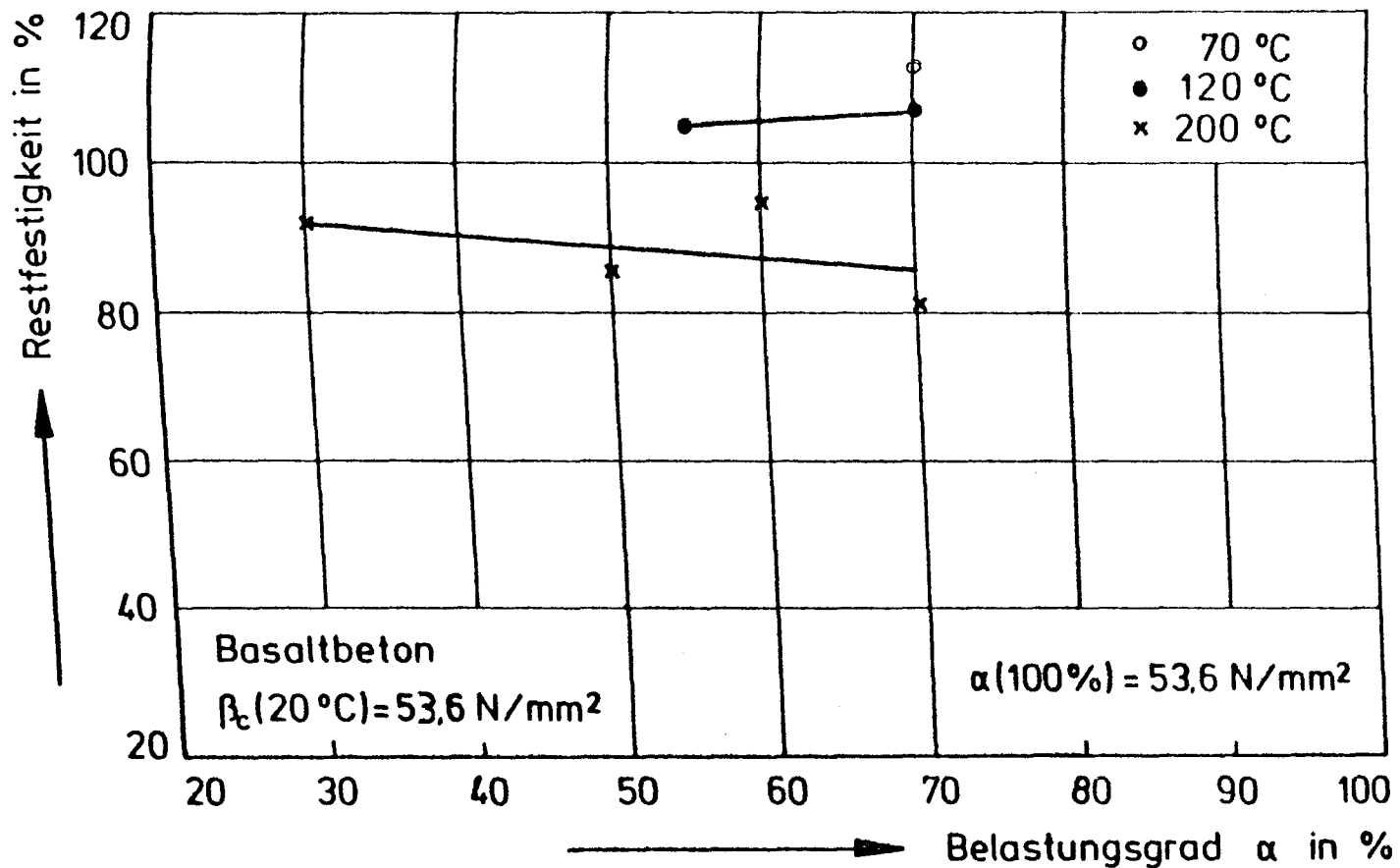


Bild 5: Restfestigkeit des Basaltbetons, ermittelt im Anschluß an die Dauerstandsversuche, in Abhängigkeit vom Belastungsgrad während der Dauerstandsprüfung

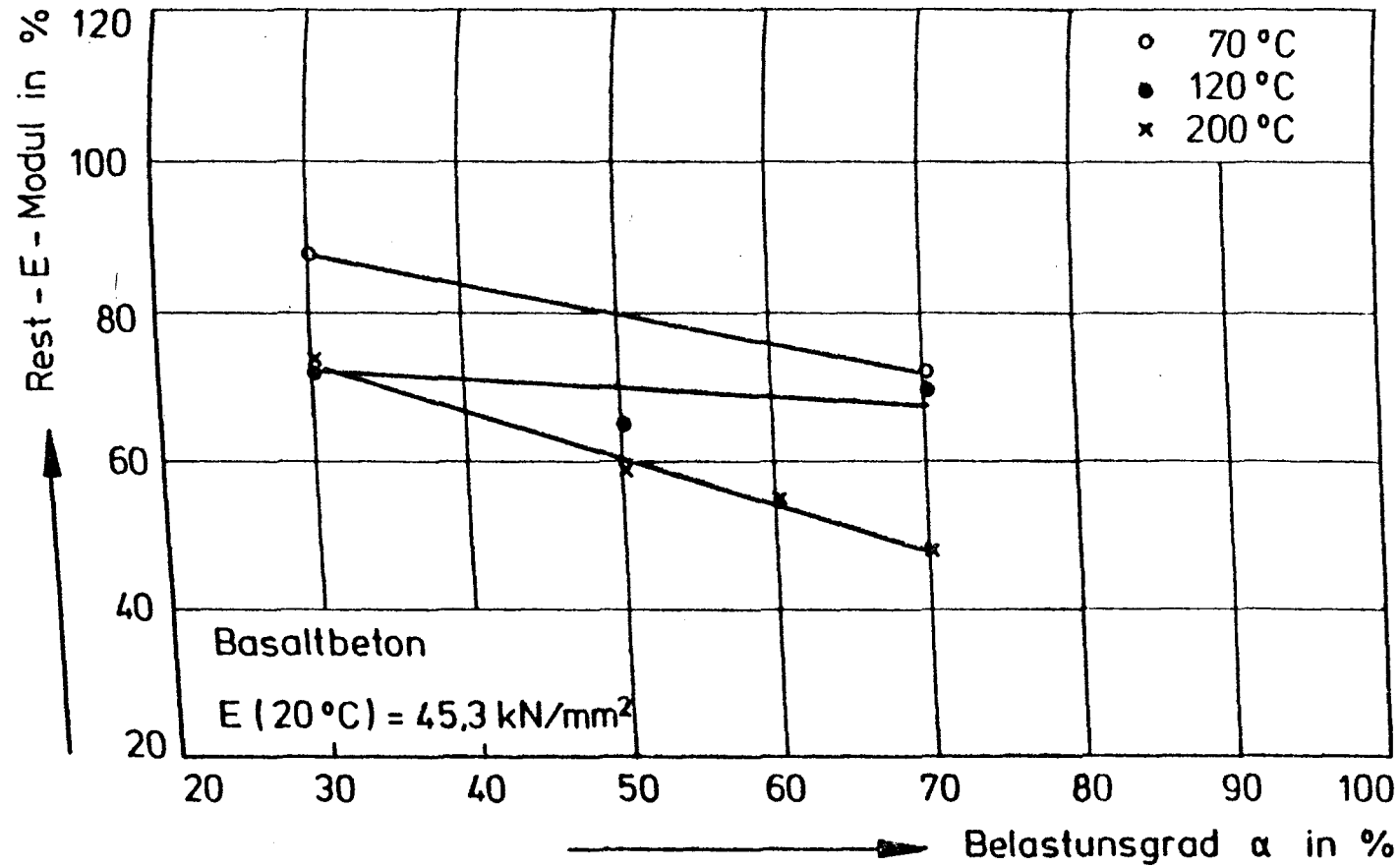


Bild 6: E-Modulverlauf des Basaltbetons, ermittelt im Anschluß an die Dauerstandsversuche an wiederabgekühlten Proben, in Abhängigkeit vom Belastungsgrad während der Dauerstandsprüfung

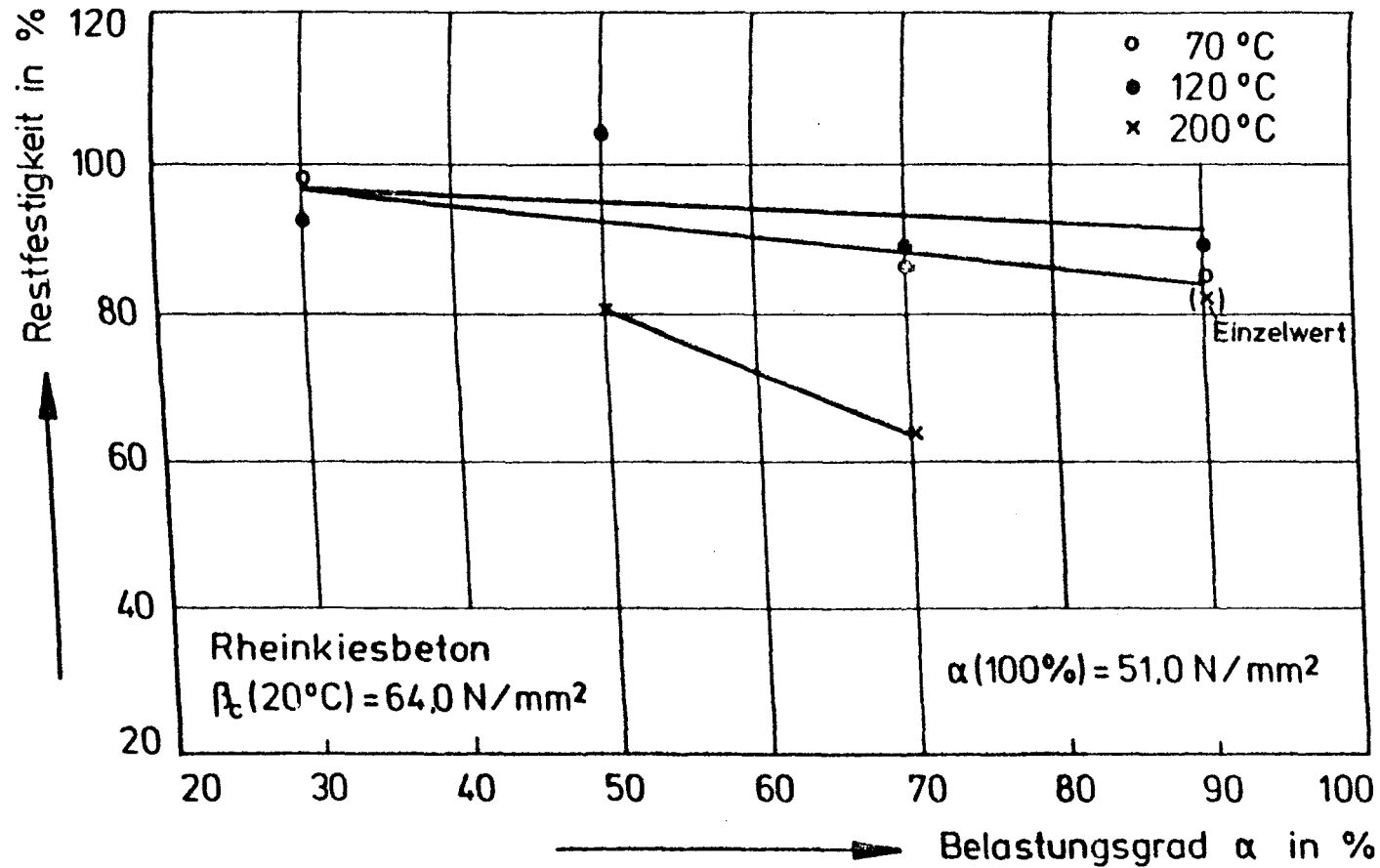


Bild 7: Restfestigkeit des Rheinkiesbetons, ermittelt im Anschluß an die Dauerstandsversuche, in Abhängigkeit vom Belastungsgrad während der Dauerstandsprüfung

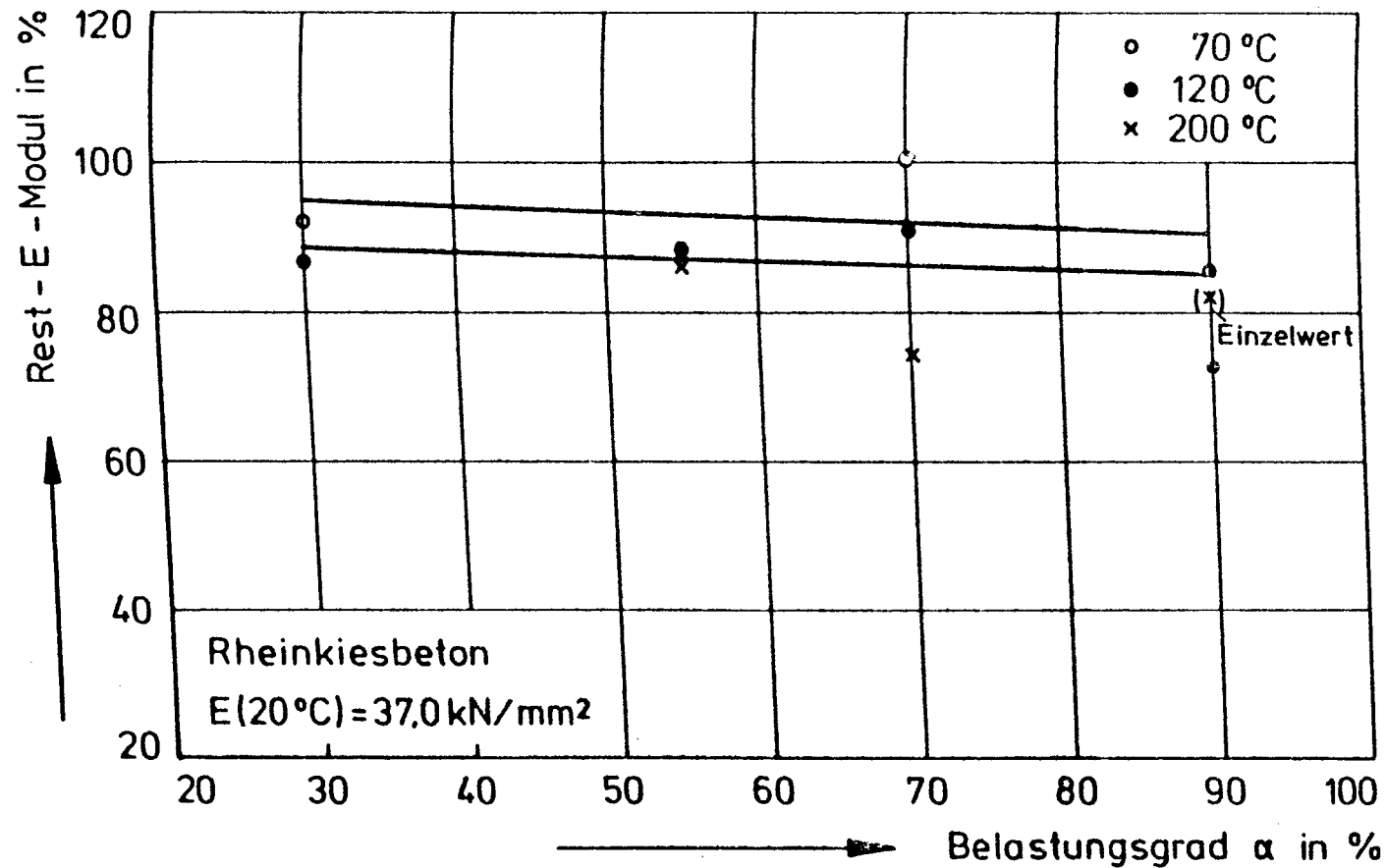


Bild 8: E-Modulverlauf von Rheinkiesbeton, ermittelt im Anschluß an die Dauerstandsversuche an wiederabgekühlten Proben, in Abhängigkeit vom Belastungsgrad während der Dauerstandsprüfung

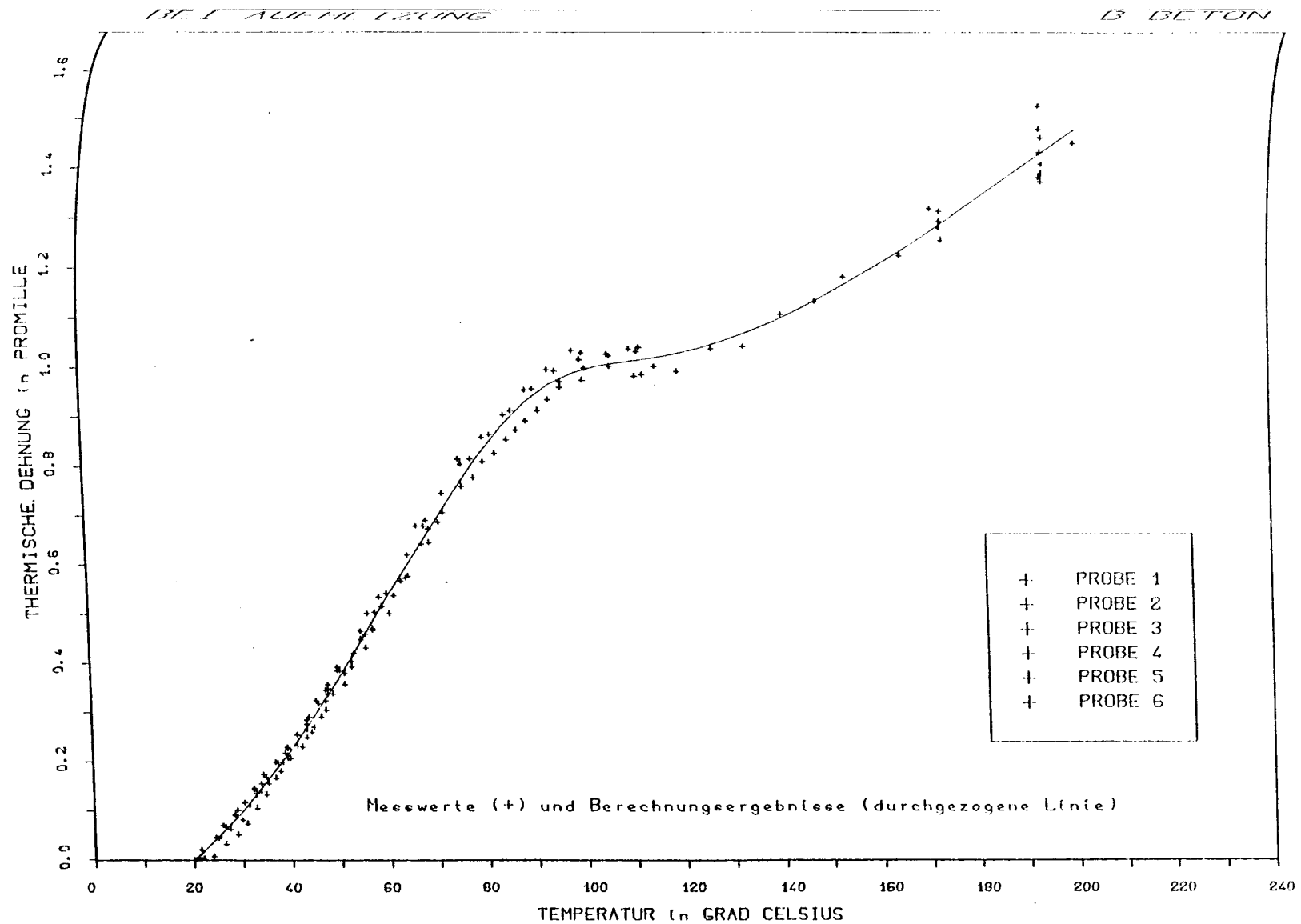


Bild 9: Thermische Ausdehnung (ϵ_{therm}) von unbelastet mit 5 K/h aufgeheizten Basaltbetonproben (\varnothing 80 mm/l = 240 mm)

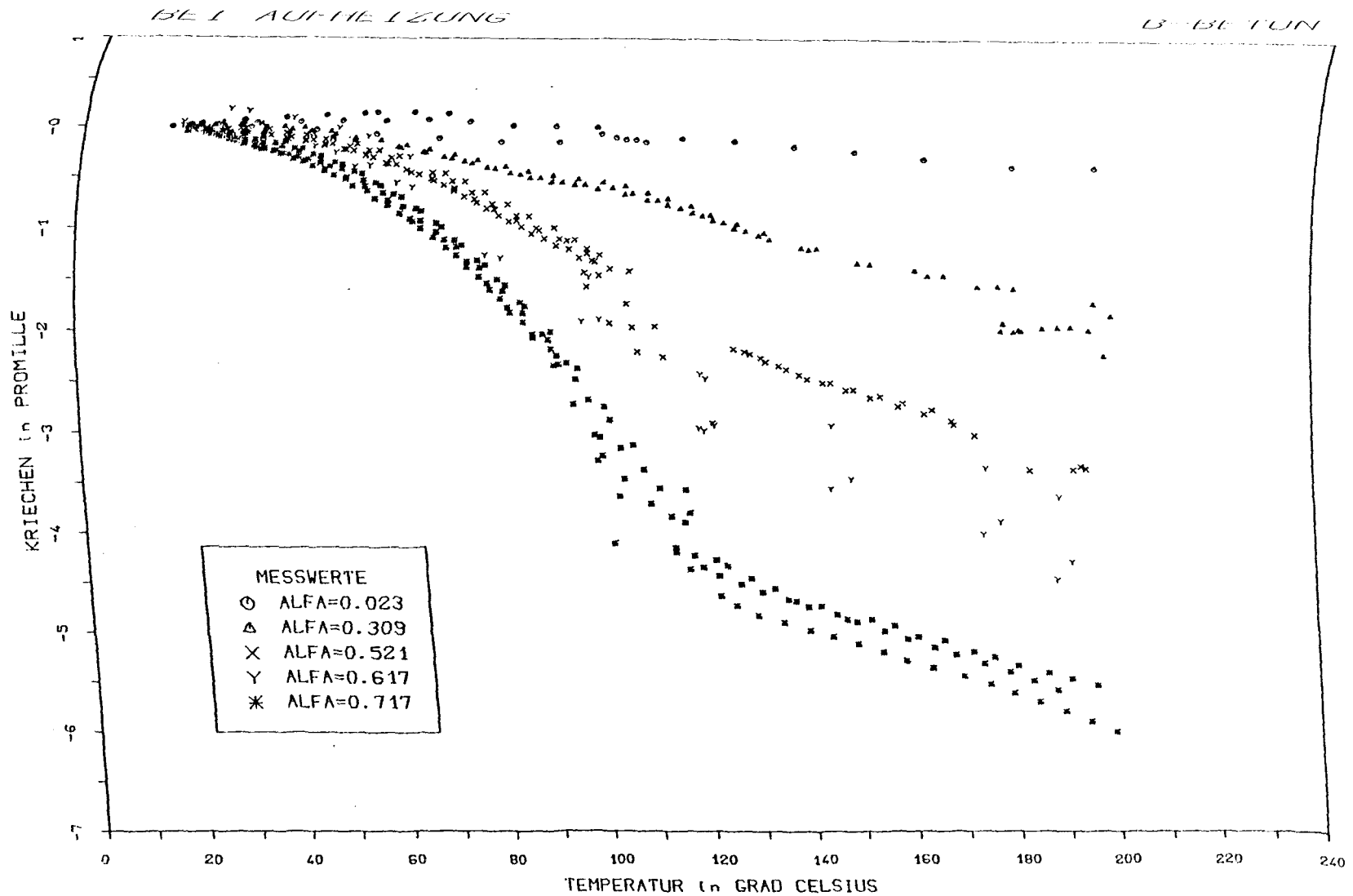


Bild 10: Aus den Gesamtverformungen berechnete instationäre Kriechverformungen
 $(\epsilon_{cr\ inst} = \epsilon_{tot} - \epsilon_{el} - \epsilon_{th})$

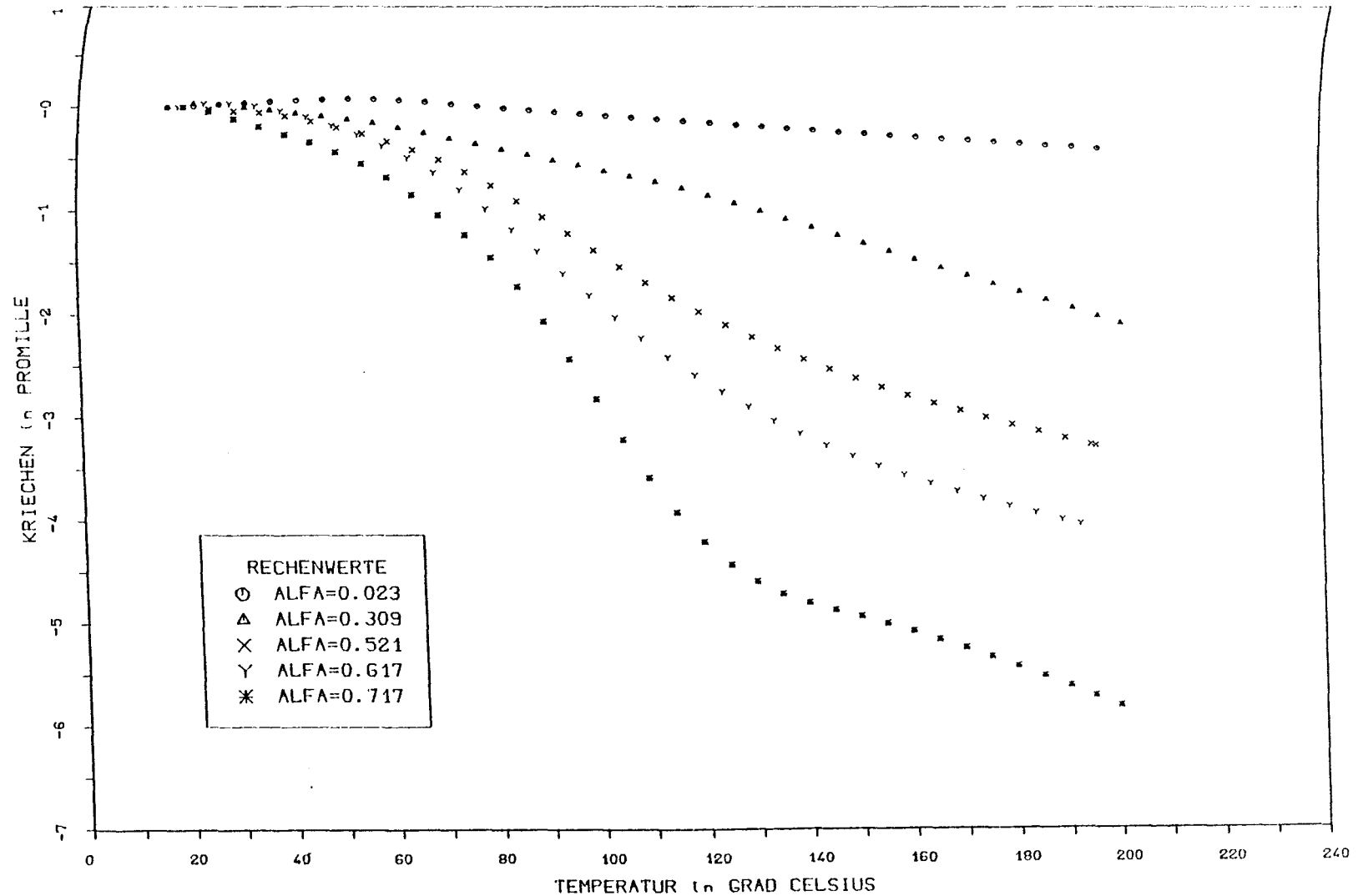


Bild 11: Aus den Meßwerten (Bild 10) gemittelte und analytisch approximierte instationäre Kriechverformungen

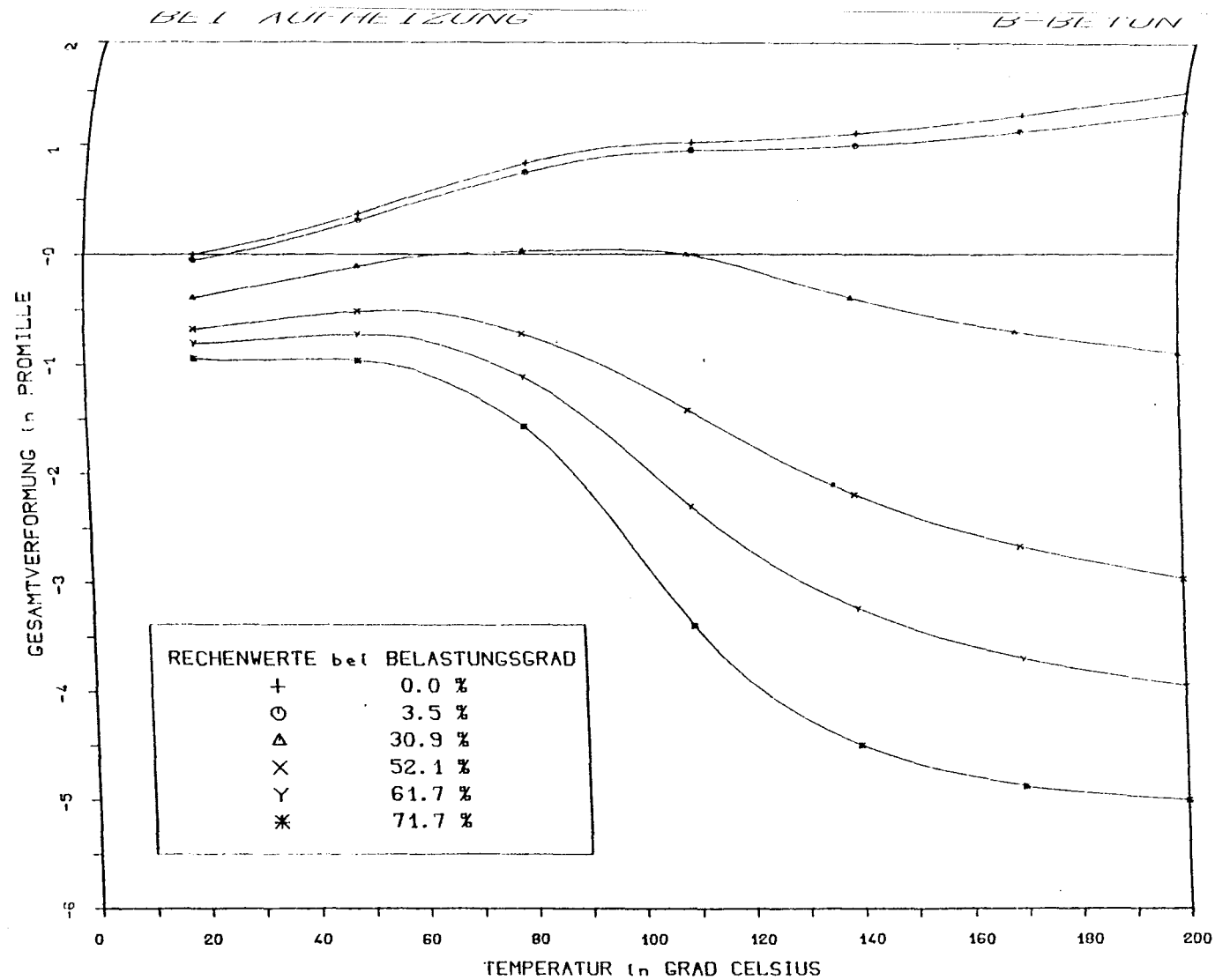


Bild 12: Aus den Einzelkomponenten analytisch bestimmte Gesamtverformungen während der Aufheizung

HTR-Betonversuche
- E-Modulversuche -

Abschlußbericht

erstattet von

Dr.-Ing. U. Diederichs

April 1986

Untersuchung im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH., Mannheim
Bestellung: 649.513.1001.09090.30/200 vom 03.02.1984

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Allgemeines	3
2. Aufgabenstellung	3
3. Experimentelles	5
3.1 Probekörper	5
3.2 Versuchsdurchführung	8
4. Versuchsergebnisse	10
4.1 Vorbemerkung	10
4.2 Elastisches Verhalten	11
4.3 Restfestigkeit	14
5. Zusammenfassung	15
6. Schrifttum	18
7. Anhang	19

1. Allgemeines

Mit Schreiben vom 03.02.1984 beauftragte die Firma Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim, das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig mit der Durchführung von Dauertemperaturversuchen an Basalt- und Rheinkiesbeton nach vorgegebener Zusammensetzung (HRB-Spezifikation: INP - 5131 - CB - GHRA 000 752 vom 29.12.1983).

Zunächst sollte mit der Herstellung und Prüfung der Proben aus Basaltbeton begonnen werden. Die Freigabe zur Herstellung der Proben aus Rheinkiesbeton erfolgte am 13.07.1984 mit dem Schreiben TR3-Web/LT vom 20.07.1984. Über die Herstellung der Versuchskörper, den Stand der Versuche und die bis zum November 1985 erzielten Versuchsergebnisse wurden bereits verschiedene Zwischenberichte /1, 2, 3/ erstattet.

Im vorliegenden Abschlußbericht sind alle Versuchsergebnisse zusammengefaßt. Vorangestellt sind dem Bericht aus Übersichtsgründen die Aufgabenstellung und Angaben über die Versuchsdurchführung.

2. Aufgabenstellung

Die E-Modul-Untersuchungen an unter Last lagernden Proben aus HTR-Beton bei hohen Temperaturen waren geplant, um das elastische Verformungsverhalten des Reaktordruckbehälters möglichst realistisch erfassen zu können.

Entsprechend den zu erwartenden Feuchte- und Temperaturzuständen des Betons im Bauwerk wurden Versuche mit versiegelten und unversiegelten Proben vorgesehen, um den Verhältnissen im Druckbehälter besonders nahe zu kommen.

Die Versuche waren auch notwendig geworden, weil aus Kapazitätsgründen auf die Ermittlung und Kompensation der elastischen Verformungen im Rahmen der Lausanner Kriechversuche verzichtet werden mußte.

Mit den Versuchen an unversiegelten Proben sowie der Herstellung der dafür erforderlichen Probekörper wurde das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig beauftragt.

Aus Handhabungs- und Kostengründen (insbesondere im Hinblick auf die Versiegelungsgefäße) und aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse waren sowohl für die versiegelten als auch für die unversiegelten Versuche Zylinder \varnothing 80/240 mm vorgesehen.

Im einzelnen sind die Versuchsdurchführung und der Versuchsumfang in der o. g. Bestellung, dem dazugehörigen Angebot - Nr. 183/Di/Schr vom 10.05.1983 - des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig und der HRB-Spezifikation PNP - 5131 - CB -GHRA - 000 752 vom 29.12.1983 festgelegt. Der Umfang der durchzuführenden Versuche geht aus Tabelle 1 hervor.

Tabelle 1: Versuchsprogramm - E-Modul-Versuche

Versuchsdauer	Temperatur		
	20 °C	70 °C	120 °C
1 d	x	x	x
7 d	x	x	x
28 d	x	x	x
90 d	x	x	x

Je Temperaturstufe waren jeweils drei Proben zu untersuchen; das ergibt für zwei Betonserien insgesamt 18 Probekörper. Die Proben sollten bei Raumtemperatur in die Prüfstände eingebaut und dann mit 15 N/mm² belastet und anschließend unter Aufrechterhaltung der Belastung mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/h auf 70 °C bzw. 120 °C aufgeheizt werden. Nach Standzeiten von jeweils einem Tag, sieben Tagen, 28 Tagen und 90 Tagen sollte der E-Modul durch mehrmaliges Be- und Entlasten der Proben bestimmt werden. Die Versuche waren mit der Bestimmung des E-Moduls und der Festigkeit nach Wiederabkühlung mit 5 K/h zu beenden.

3. Experimentelles

3.1 Probekörper

Für die Versuchsdurchführung wurden je Betonart mindestens neun Proben benötigt. Da für die Dauerstandsversuche ausreichend Reserveproben betoniert worden waren, konnte der größte Teil der Proben für die E-Modul-Versuche aus den entsprechenden Betonierserien für die Dauerstandsversuche entnommen werden. Für zwei Versuche mit Rheinkiesbeton wurden darüber hinaus Proben aus der Betoniercharge für die Hochtemperaturkriechversuche (Zylinder \varnothing 8 cm, $l = 30$ cm, Probenbezeichnung R 221 - R 240) verwendet. Zur leichteren Orientierung sind die Betoniertermine und die Bezeichnungen der Probekörper nochmals in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 2: Betoniertermine und Bezeichnung der Probekörper

Herstellungsdatum/ Beton-Nr.	Probenbezeichnung	Probenanzahl und -art
15.03.1984 Nr. 46/84 (Basaltbeton)	A 301 - A 336 A 341 - A 348 AW 301 - AW 312	36 Zylinder \varnothing 8 cm, $l = 30$ cm 8 Zylinder \varnothing 15 cm, $l = 30$ cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³
01.10.1984 Nr. 152/84 (Rheinkiesbeton)	R 101 ÷ R 136 R 141 ÷ R 143 RW 101 ÷ RW 112 RW 113 ÷ RW 124	36 Zylinder \varnothing 8 cm, $l = 30$ cm 3 Zylinder \varnothing 15 cm, $l = 30$ cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³ 12 Würfel 20/20/20 cm ³
22.10.1984 Nr. 164/84 (Rheinkiesbeton)	R 301 ÷ R 336 R 341 ÷ R 348 RW 301 ÷ RW 312 RW 313 ÷ RW 317	36 Zylinder \varnothing 8 cm, $l = 30$ cm 8 Zylinder \varnothing 15 cm, $l = 30$ cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³ 5 Würfel 20/20/20 cm ³
01.04.1985 Nr. 38/85 (Rheinkiesbeton)	R 221 ÷ R 240 R 201 ÷ R 212 RW 201 ÷ RW 212 RW 213 ÷ RW 224	20 Zylinder \varnothing 8 cm, $l = 30$ cm 12 Zylinder \varnothing 15 cm, $l = 30$ cm 12 Würfel 15/15/15 cm ³ 12 Würfel 20/20/20 cm ³

Da über die Probekörperherstellung bzw. Probenvorbereitung und -lagerung bis zum Versuchsbeginn ausführlich in /1, 2, 4 und 5/ berichtet worden ist, wird an dieser Stelle darauf verzichtet.

Im folgenden sind jedoch aus Übersichtsgründen die Referenzwerte der Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten für die bei den E-Modul-Versuchen verwendeten Betonserien zusammengestellt. Eine ausführliche Diskussion der Daten ist in /4/ und /5/ gegeben.

Tabelle 3: Referenzwerte der Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten des Basaltbetons bei Raumtemperatur (Lagerung der Proben bis zum Versuchsbeginn unter Wasser bei 20 °C)

Probekörper Nr.	Art der Proben	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Rohdichte [kg/dm ³]	Bemerkungen
A 341 A 342 A 343	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	77 73 76 $\bar{x} = 75$	42,8 42,9 47,4 44,4	2,54 2,53 2,54 2,54	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN Probenalter: 95 d
A 303 A 319 A 331	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	74 79 75 $\bar{x} = 76$	- - - -	2,56 2,54 2,54 2,55	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: TONI 600 kN, Probenalter 620 d
A 315 A 325 A 336	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	80 79 77 $\bar{x} = 79$	48,5 50,3 49,5 49,4	2,55 2,56 2,54 2,55	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: TONI 600 kN Probenalter: 660 d
AW 307 AW 308 AW 309	Würfel 15/15/15 cm ³	80 82 78 $\bar{x} = 80$	- - - -	2,57 2,55 2,57 2,56	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
AW 310 AW 311 AW 312	Würfel 15/15/15 cm ³	89 81 78 $\bar{x} = 83$	- - - -	2,51 2,51 2,51 2,51	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN Probenalter: 802 d

Tabelle 4: Referenzwerte der Kurzzeitdruckfestigkeiten, E-Moduln und Rohdichten der Rheinkiesbetonserien bei Raumtemperatur (Lagerung der Proben bis zum Versuchsbeginn unter Wasser bei 20 °C)

Probekörper Nr.	Art der Proben	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Rohdichte [kg/dm ³]	Bemerkungen
R 141 R 142 R 143	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	67 66 68 $\bar{x} = 67$	37,6 35,4 34,3 35,8	2,44 2,44 2,44 2,44	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
R 115 R 117 R 129	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	68 70 67 $\bar{x} = 68$	- - - -	2,42 2,42 2,42 2,42	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: TONI 600 kN Probenalter: 335 d
R 111 R 131 R 112	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	68 64 64 $\bar{x} = 65$	40,2 38,7 40,5 39,8	- - - -	Prüfung mit servohydraulischer Prüfmaschine Schenck, 400 kN Probenalter: 334 d
RW 107 RW 108 RW 109	Würfel 15/15/15	71 73 69 $\bar{x} = 71$	- - - -	2,44 2,43 2,45 2,44	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 93 d
R 341 R 342 R 343	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	67 65 66 $\bar{x} = 66$	34,7 31,1 33,5 33,1	2,43 2,43 2,43 2,43	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
R 305 R 316 R 327	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	66 65 65 $\bar{x} = 65$	- - - -	2,41 2,42 2,42 2,42	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: TONI 6 00 kN Probenalter: 140 d
R 323 R 335 R 334	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	67 63 62 $\bar{x} = 64$	36,7 37,6 36,6 37,0	- - - -	Prüfung mit servohydraulischer Prüfmaschine: Schenck, 400 kN Probenalter: 141 d
RW 307 RW 308 RW 309	Würfel 15/15/15	65 69 67 $\bar{x} = 67$	- - - -	2,44 2,44 2,45 2,44	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
RW 310 RW 311 RW 312	Würfel 15/15/15	73 78 70 $\bar{x} = 74$	- - - -	2,43 2,42 2,42 2,42	Prüfung in Halle I Prüfmaschine: Schenck-Trebel, 5.000 kN Probenalter: 581 d

Fortsetzung der Tabelle 4 siehe Blatt 7

Fortsetzung der Tabelle 4

Probekörper Nr.	Art der Proben	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [kN/mm ²]	Rohdichte [kg/dm ³]	Bemerkungen
R 206 R 208 R 210	Zylinder Ø 15/1 = 30 cm	68 68 66	35,4 33,3 32,4	2,42 2,41 2,40	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN Probenalter: 171 d
		$\bar{x} = 67$	33,7	2,41	
R 221 R 222 R 223	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	69 72 66	- - -	2,43 2,43 2,43	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: TONI, 600 kN Probenalter: 437 d
		$\bar{x} = 69$	-	2,43	
R 227 R 228 R 237	Zylinder Ø 8/1 = 24 cm	43 ^{*)} 58 70	39,2 39,9 40,3		Prüfung mit servohy- draulischer Prüfmaschi- ne: Schenck 400 kN Probenalter: 438 d
		$\bar{x} = 64$	39,8		
RW 207 RW 208 RW 209	Würfel 15/15/15	70 66 71	- - -	2,39 2,39 2,40	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN Probenalter: 90 d
		$\bar{x} = 69$	-	2,39	
RW 210 RW 211 RW 212	Würfel 15/15/15	74 77 73	- - -	2,40 2,40 2,41	Prüfung in Halle I, Prüfmaschine: Schenck- Trebel, 5.000 kN Probenalter: 360 d
		$\bar{x} = 75$	-	2,40	

*) Probekörperendflächen waren nicht planparallel, Festigkeitswerte wurden daher bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

3.2 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Versuche standen am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz ein Hochtemperatur-Kriechprüfstand, in dem jeweils mehrere Probekörper gleichzeitig bei hohen Temperaturen untersucht werden können, und ein Prüfstand (siehe Bild 1), mit dem gleichzeitig drei Proben bei Raumtemperatur geprüft werden können, zur Verfügung. Orientierend wurden auch einige Versuche im servohydraulischen Hochtemperaturprüfstand (vgl. /4/) durchgeführt.

Bei den Hochtemperatur-Kriechprüfständen werden die Kräfte pneumatisch erzeugt und mit Hilfe von Druckkissen auf die Belastungsstempel übertragen. Das Einstellen der Belastungshöhe und das Nachjustieren erfolgen per Hand. Das Belastungssystem arbeitet unabhängig vom Stromversorgungsnetz und ist deshalb besonders für Langzeituntersuchungen geeignet, da kurzzeitige Stromabschaltungen oder -ausfälle die Versuchsdurchführung nicht wesentlich beeinträchtigen. Weitere Details zum Aufbau und zur Funktion der Prüfstände sowie zur Durchführung von Eichversuchen sind in /4/ enthalten.

Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der elastischen Kennwerte erfolgte in ähnlicher Weise wie bei der Ermittlung der Dauerstandsfestigkeiten. Sie ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ werden die Proben in die Prüfstände eingebaut. Danach werden die Proben zunächst dreimal bis 15 N/mm^2 belastet. Dabei wird jeweils die elastische Verformung gemessen. Anschließend erfolgt bei Raumtemperatur die Belastung der Probekörper mit dem angestrebten Belastungsniveau von 15 N/mm^2 .

Unter Belastung werden dann die bei 70°C und bei 120°C zu prüfenden Probekörper mit 5 K/h , gemessen auf der Probenoberfläche, bis zum Erreichen der angestrebten Versuchstemperatur aufgeheizt. Nach den in der Tabelle 1 angegebenen Standzeiten erfolgt dann die Ermittlung der E-Moduln durch dreimaliges Ent- und Belasten der Proben.

Nach 90 Tagen werden die 70°C - und 120°C -Proben mit ca. 5 K/h unter aufrechterhaltener Last abgekühlt. Anschließend werden die Proben in die servohydraulische Prüfmaschine eingebaut und der E-Modul und die Restfestigkeit bestimmt.

Die 20°C -Versuche werden nach dem gleichen Schema durchgeführt, jedoch entfallen die Aufheizung und die Abkühlung.

Die Prüfstände, mit denen die 20°C -Versuche durchgeführt wurden, waren in einem Kellerraum der Halle V des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz aufgestellt. Der Raum wurde während der Versuchsdurchführung nicht klimatisiert. Aufgrund von langfristigen Beobachtungen kann jedoch davon ausgegangen werden, daß im Verlaufe der Versuchsdurchführung eine

Umgebungstemperatur von $18\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ und eine relative Luftfeuchte von $60\% \pm 5\%$ vorgeherrscht haben. Diese Werte wurden durch orientierende Messungen während der Versuchsdurchführung auch bestätigt.

Bei allen Versuchen wurden die Betonverformungen während der Versuchsdurchführung ständig in bestimmten Zeitintervallen registriert.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Vorbemerkung

Die E-Modulbestimmung erfolgte, wie bereits erwähnt, jeweils durch dreimaliges Be- und Entlasten der Proben. In den pneumatischen Hochtemperaturkriechprüfständen wurden dazu der Luftdruck nach dem Einbau bzw. zu den in Tabelle 1 angegebenen Zeitpunkten in Stufen von 5 bar ($\approx 3\text{ N/mm}^2$) bis auf maximal 40 bar ($\approx 24\text{ N/mm}^2$) gesteigert und die Verformungen nach Erreichen der jeweiligen Druckstufe abgelesen und notiert bzw. mit dem Datenerfassungsgerät aufgenommen. Ein Meßzyklus dauerte ca. 30 bis 40 min.

Ergänzend zu diesen E-Modul-Bestimmungen wurde der E-Modul durch zügiges Be- und Entlasten von ausgewählten Proben in der servohydraulischen Hochtemperaturprüfmaschine ermittelt. Dabei betrug die Unterlast $0,5\text{ N/mm}^2$ und die Oberlast 25 N/mm^2 . Als Belastungsgeschwindigkeit wurde einheitlich $0,5\text{ N/mm}^2$ pro Sekunde gewählt. Die ergänzenden Untersuchungen wurden an drei Basaltbetonprobekörpern durchgeführt: Probe A 311 wurde ca. 14 Tage lang bei Raumtemperatur mit 15 N/mm^2 belastet, und die Proben A 307 und A 301 wurden belastet aufgeheizt und ca. 14 Tage lang unter Aufrechterhaltung der Last von 15 N/mm^2 bei 70 °C bzw. 120 °C temperiert.

Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen sind beispielhaft für den bei 70 °C temperierten Basaltprobekörper in Bild 3 dargestellt. Es zeigt jeweils die Spannungsdehnungsverläufe des 1. und 3. Be- und Entlastungszyklus kurz nach dem Einbau der Probe (20 °C -Kurve), kurz nach dem Erreichen der Prüftemperatur ($70\text{ °C}/1\text{ h}$) sowie nach eintätiger und siebentägiger Temperierung und nach Wiederabkühlung der Probe auf 20 °C . Zum Vergleich sind die Spannungsdehnungs-Linien einer unbelastet auf 70 °C aufgeheizten Probe, die im wiederabgekühlten Zustand geprüft worden war (aus /6/), angegeben.

Man erkennt, daß sich nach einstündiger Temperierung bei 70 °C die bleibenden Verkürzungen und die Hysterese zwischen 1. Belastung und 1. Entlastung kaum gegenüber dem Ausgangszustand (20 °C) vergrößert haben. Im Vergleich zum Ausgangszustand hat sich der E-Modul, berechnet als Sekantenmodul zwischen 0,5 N/mm² und 25 N/mm²) nur um 6,8 % erniedrigt hat. Im Verlaufe der weiteren Temperierung sinkt der E-Modul nur noch sehr geringfügig ab: Um 1,6 % im Verlaufe des 1. Tages und um 3,9 % nach weiteren sechs Tagen. Durch die erfolgte Abkühlung erfährt der E-Modul kaum noch eine weitere Verkleinerung. Im Vergleich zum gleichlangen, aber unbelastet temperierten Probekörper weist der belastet temperierte Probekörper einen halb so großen E-Modul-Abfall und eine deutlich kleinere Hysterese zwischen der ersten Be- und Entlastung auf.

Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten belastet und unbelastet auf-geheizter Proben - Beeinflussung der Mikrorißbildung durch äußere mechanische Spannungen - wurde bereits ausführlich in /4/ diskutiert, so daß an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden muß. Von Bedeutung für die weiteren Auswertungen der E-Modulversuche ist jedoch die Tatsache, daß sich die E-Moduln von im Heißen geprüften Proben nach langandauernder Temperierung kaum von den nach Abkühlung gemessenen E-Moduln unterscheiden. Da die E-Moduln der Proben vor Beginn der Temperierung und im heißen Zustand jeweils in den pneumatischen Prüfständen, die E-Moduln nach Wiederabkühlung jedoch im servohydraulischen Prüfstand (mit höherer Genauigkeit der Kraftanzeige) ermittelt wurden, lassen sich durch Gegenüberstellung der Meßergebnisse aus beiden Prüfanlagen Aussagen über die korrekte Funktion beider Systeme gewinnen.

4.2 Elastisches Verhalten

Die Ergebnisse der E-Moduluntersuchungen sind in den Tabellen 5 bis 8 sowie in den Bildern 4 und 5 im Anhang zusammengestellt. Die Tabellen enthalten zu Vergleichszwecken neben den Absolutwerten der E-Moduln auch Prozentangaben. Die Prozentangaben beziehen sich dabei jeweils auf die mit dem gleichen Probekörper bei Raumtemperatur vor Beginn der Aufheizung bzw. Dauerbelastung gemessenen E-Moduln (E-Modul kurz nach dem Einbau entspricht jeweils 100 %).

Die 90-Tage-Werte bei den Proben A 307, A 301 und A 311 fehlen, da diese orientierenden Versuche in der servohydraulischen Anlage nach jeweils 14 Tagen abgebrochen wurden. Die Proben A 313 und A 323 wurden 90 Tage lang belastet und temperiert, die E-Moduln wurden jedoch versehentlich nach 90tägiger Belastung im heißen Zustand nicht gemessen, sondern erst nach Wiederabkühlung.

Sowohl beim Basaltbeton als auch beim Rheinkiesbeton lassen sich die Ergebnisse eindeutig nach den Versuchstemperaturen eingruppierten: Je höher die Versuchstemperatur, desto stärker der E-Modul-Abfall.

Die bei 20 °C belasteten Proben des Basaltbetons zeigen keine Veränderung des E-Moduls im Verlaufe der Dauerbelastung. Auch der Umbau der Proben vom pneumatischen in den servohydraulischen Prüfstand hat keine Änderung der E-Moduln zur Folge. Daraus kann auch der Schluß gezogen werden, daß beide Belastungs- und Meßsysteme einwandfrei funktioniert haben.

Entgegen dem Verhalten des Basaltbetons nimmt der E-Modul des Rheinkiesbetons 20 °C-Lagerung unter Dauerbelastung stetig mit der Versuchsdauer zu. Nach 90 Tagen ergeben sich durchschnittliche Steigerungen der E-Moduln von ca. 18 %. Nach dem Umbau der Proben in den servohydraulischen Prüfstand zeigten die Proben immer noch um 9 % höhere E-Moduln als im Ausgangszustand, so daß davon ausgegangen werden muß, daß durch die mechanische Langzeitbeanspruchung tatsächlich eine E-Modulerhöhung erfolgt ist.

Eine der Ursachen für die E-Modul-Erhöhung könnte die Verfestigung der Zementsteinmatrix durch die partielle Austrocknung der Proben im Verlauf der Dauerbelastung sein, denn die Proben wurden erst kurz vor Beginn des Einbaus dem Wasserlagerungsbecken entnommen und konnten bei den vorherrschenden Umgebungsbedingungen (ca. 18 °C, 60 % r.F.) sicher einen Teil des physikalisch gebundenen Wassers abgeben. Eine weitere Möglichkeit der Zementsteinverfestigung bestünde in der fortschreitenden Hydratation der Proben während der Dauerbelastung. Dieser Effekt dürfte jedoch zu vernachlässigen sein, da die Proben bei Beginn der Prüfungen bereits ein Alter von 256 Tagen hatten.

Bei Versuchsbeginn lagen die Absolutwerte der E-Moduln des Basaltbetons mit $49,0 \text{ kN/mm}^2$ offenbar so stark über den entsprechenden Werten des Rheinkiesbetons ($35,9 \text{ kN/mm}^2$), daß auch durch weitere Verfestigung der Zementsteinmatrix infolge seiner austrocknungs- bzw. belastungsbedingten Strukturverdichtung eine weitere E-Modul-Erhöhung kaum zu erwarten war.

Die Temperierung des Basaltbetons bei 70°C führt bereits nach einem Tag zu einer Erniedrigung des E-Moduls um $8,6\%$. Im Verlauf der weiteren 89tägigen Temperierung kommt es dann nur noch zu einer sehr geringen Abnahme des E-Moduls. Selbst nach Wiederabkühlung beträgt der E-Modul-Abfall gegenüber dem Ausgangszustand nur $11,8\%$. Der E-Modul des Rheinkiesbetons zeigt nicht diesen deutlichen Abfall. Er ändert sich im Verlauf der gesamten Temperierungsdauer fast überhaupt nicht. Nach 90tägiger Temperierung beträgt die E-Modul-Abnahme nur $2,5\%$. Durch die Abkühlung wird ebenfalls nur ein geringer weiterer Verlust an Elastizität verursacht (-5%).

Die Beanspruchung bei 120°C führt beim Basaltbeton bereits nach einem Tag zu einer deutlichen E-Modul-Abnahme von ca. 17% . Im Verlauf der weiteren Temperierung sinkt der E-Modul dann bis ca. 56 Tagen stetig weiter bis auf $72,5\%$ des Ausgangswertes ab. Die Abkühlung unter Last ruft dann nur noch eine vernachlässigbare Reduktion des E-Moduls hervor. Beim Rheinkiesbeton nimmt der E-Modul zwar auch deutlich im Verlauf der 120°C -Temperierung ab, die Abnahme erfolgt jedoch wesentlich langsamer mit der Temperierungsdauer als beim Basaltbeton. Aber auch beim Rheinkiesbeton scheint die E-Modul-Abnahme nach etwa 56tägiger Temperierung im wesentlichen abgeschlossen zu sein. Auch beim Rheinkiesbeton wird der E-Modul durch die Abkühlung nur unwesentlich erniedrigt.

Vergleicht man die Werte der belastet aufgeheizten und im wiederabgekühlten Zustand geprüften Proben mit den entsprechenden Werten der unbelastet, ebenfalls 90 Tage temperierten Proben (vgl. /6/), so kann man feststellen, daß die unbelasteten Proben jeweils um 20 bis 30 % niedrigere Werte der E-Moduln aufweisen als die belasteten Proben. Dies hat, wie bereits erwähnt, seine Ursachen in der Beeinflussung der Mikrorißbildung durch die äußere Last und ist bei der Verwendung der ermittelten Daten für Berechnungen besonders zu berücksichtigen.

4.3 Restfestigkeiten

Die Ergebnisse der Restfestigkeitsuntersuchungen sind in den Tabellen 7 und 8 sowie in Bild 6 zusammenfassend dargestellt. Die Prozentangaben der Restfestigkeiten des Basaltbetons in Tabelle 7 beziehen sich auf die an den Proben A 315, A 325 und A 336 gemessenen Festigkeiten. Da bei der Ermittlung dieser Referenzwerte eine etwas steifere Prüfmaschine verwendet wurde als bei der Ermittlung der Restfestigkeiten, könnten die prozentualen Restfestigkeiten jedoch zu niedrige Werte liefern.

Beim Rheinkiesbeton wurden die Restfestigkeiten bei allen Proben einheitlich auf 64 N/mm^2 bezogen. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert der in Tabelle 4 angegebenen Festigkeiten, die beim Prüfen der 8er Zylinder mit der servohydraulischen Prüfmaschine gemessen wurden.

Wie Bild 6 deutlich macht, werden die Restfestigkeiten merklich vom Temperaturniveau während der Dauerbelastung bestimmt. Beim Basaltbeton sinkt die Festigkeit, selbst wenn man die beschränkte Aussagefähigkeit der Prozentangaben berücksichtigt, allein durch die Beanspruchung mit der Dauerlast bei Raumtemperatur um ca. 15 % gegenüber dem Referenzwert von 79 N/mm^2 ab. Eine zusätzliche Temperaturbeanspruchung zieht dann nur noch vergleichsweise geringe Festigkeitsminderungen nach sich (weitere 6 % Festigkeitsverlust bei 70°C und weitere 9 % gegenüber der 70°C -Temperierung bei 120°C -Temperierung).

Beim Rheinkiesbeton verändert sich bei der 70°C -Temperierung die Festigkeit gegenüber dem Referenzwert kaum. Im Vergleich dazu ist der Festigkeitsabfall bei der 120°C -Temperierung erheblich (17,5 %). Andererseits überrascht die gravierende Festigkeitssteigerung der bei Raumtemperatur dauerbelasteten Proben.

Vergleicht man nur die absoluten Festigkeiten, so kann man dagegen feststellen, daß sich der Basaltbeton nach der Temperierung bei 70°C und 120°C hinsichtlich der Festigkeiten vom Rheinkiesbeton fast überhaupt nicht unterscheidet und die größeren Differenzen in den Festigkeiten der beiden Betone praktisch nur aus dem unterschiedlichen Verhalten bei Raumtemperatur resultieren.

Während die beobachtete Festigkeitserhöhung des Rheinkiesbetons unter Dauerlast bei 20 °C im Einklang mit den vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnissen steht (Abbau von Spannungsspitzen durch Kriechen, Verfestigung der Zementsteinmatrix durch Austrocknung usw.), lassen sich über den Festigkeitsverlust des Basaltbetons unter den gleichen Beanspruchungsbedingungen lediglich Vermutungen anstellen (stärkere Spannungskonzentrationen infolge des hohen E-Moduls könnten im Verlaufe der Dauerstandsbelastung zu festigkeitsmindernden Mikrorißbildungen geführt haben). Zur Erhärtung dieser Vermutungen wären noch weitere Untersuchungen unter Einbeziehung der Ergebnisse der Gesamthochschule Kassel sowie strukturanalytischer Methoden notwendig.

Zusammenfassend läßt sich jedoch feststellen, daß beide Betone, von zwei Ausnahmen abgesehen (Probe A 321, 95,5 °C; Probe R 328, 120 °C), nach Beendigung der Dauertemperierung unter Last höhere Restfestigkeiten als die Nennfestigkeit aufweisen.

5. Zusammenfassung

Berichtet wird über E-Modul-Versuche mit HTR-Betonprobekörpern. Die E-Modul-Untersuchungen an belastet aufgeheizten und temperierten Proben wurden geplant und durchgeführt, um das elastische Verformungsverhalten des Reaktordruckbehälters möglichst realistisch erfassen zu können. Die Versuche waren auch notwendig geworden, weil aus Kapazitätsgründen auf die Ermittlung und Kompensation der elastischen Verformungen im Rahmen der Lausanner Kriechversuche verzichtet werden mußte.

Entsprechend den zu erwartenden Feuchte- und Temperaturzuständen des Betons im Bauwerk wurden Versuche mit versiegelten und unversiegelten Proben vorgesehen. Die Versuche mit unversiegelten Proben sowie die Herstellung der dafür erforderlichen Probekörper wurden im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt.

Aus Handhabungs- und Kostengründen (insbesondere im Hinblick auf die Versiegelungsgefäße) und aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden sowohl für die versiegelten als auch für die unversiegelten Versuche

Zylinder \varnothing 80/240 mm verwendet. Es wurden je Temperaturstufe (20 °C, 70 °C und 120 °C) drei unversiegelte Proben untersucht, so daß insgesamt neun Probekörper eines jeden Betons über 90 Tage zu beobachten waren.

Für die Durchführung der Versuche standen am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz ein Hochtemperatur-Kriechprüfstand, in dem jeweils zwei Probekörper gleichzeitig bei hohen Temperaturen untersucht werden können, und ein Prüfstand, mit dem gleichzeitig drei Proben bei Raumtemperatur geprüft werden können, zur Verfügung. Bei den Hochtemperatur-Kriechprüfständen werden die Kräfte pneumatisch erzeugt und mit Hilfe von Druckkissen auf die Belastungsstempel übertragen. Das Einstellen der Belastungshöhe und das Nachjustieren erfolgen per Hand. Das Belastungssystem arbeitet unabhängig vom Stromversorgungsnetz und ist deshalb besonders für Langzeituntersuchungen geeignet, da kurzzeitige Stromabschaltungen oder -ausfälle die Versuchsdurchführung nicht wesentlich beeinträchtigen.

Zur Durchführung der E-Modulversuche wurden die Proben in die Prüfstände eingebaut. Danach wurden sie zunächst dreimal be- und entlastet. Dabei wurden jeweils die elastischen Verformungen gemessen. Anschließend erfolgte bei Raumtemperatur die Belastung der Probekörper mit dem angestrebten Belastungsniveau von 15 N/mm². Unter Belastung wurden dann die bei 70 °C und 120 °C zu prüfenden Probekörper mit 5 K/h, gemessen auf der Probenoberfläche, bis zum Erreichen der angestrebten Versuchstemperatur aufgeheizt.

Nach Standzeiten von einem Tag, 7 Tagen, 28 Tagen und 90 Tagen wurden dann die E-Moduln durch dreimaliges Ent- und Belasten der Proben ermittelt. Nach 90 Tagen wurden die 70 °C- und 120 °C-Proben mit ca. 5 K/h unter aufrechterhaltener Last abgekühlt. Sodann wurden der Rest-E-Modul und die Restfestigkeit bestimmt.

Die Ergebnisse der E-Modul-Versuche können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 20 °C-Versuche

Bei Lagerung unter Last verändert sich der E-Modul des Basaltbetons im Verlaufe von 90 Tagen kaum, während beim Rheinkiesbeton ein stetiges Anwachsen des E-Moduls zu beobachten ist. Die Festigkeit des Rheinkiesbetons erhöht sich im Vergleich zu Proben, die ohne mechanische Vorbelastung geprüft worden waren, um ca. 30 %. Beim Basaltbeton ist dagegen eine leichte Festigkeitsminderung zu beobachten.

- 70 °C-Versuche

Beim Rheinkiesbeton ist im Verlaufe der Versuchslagerung keine Änderung des E-Moduls gegenüber dem Ausgangszustand zu beobachten; auch die Festigkeit verändert sich nicht. Beim Basaltbeton sinkt der E-Modul bereits nach eintägiger Temperierung auf 90 % des Ausgangswertes, verändert sich jedoch dann kaum noch. Die Restfestigkeit des Rheinkiesbetons unterscheidet sich nur minimal von der Ausgangsfestigkeit, während beim Basaltbeton eine Abnahme von ca. 20 % auftrat. Absolut gesehen unterscheiden sich die Festigkeitswerte der beiden Betone kaum. Die nach dem Wiedererkalten gemessenen E-Moduln liegen sowohl beim Rheinkiesbeton als auch beim Basaltbeton nur geringfügig unter den im warmen Zustand gemessenen Werten.

- 120 °C-Versuche

Sowohl beim Basalt- als auch beim Rheinkiesbeton sinken die E-Moduln innerhalb der ersten 28 bis 56 Tage der Versuchslagerung (beim Rheinkiesbeton auf ca. 90 %, beim Basaltbeton auf 73,5 %). Anschließend, d. h. auch im abgekühlten Zustand, verändern sich die E-Moduln kaum noch. Die Restfestigkeiten beider Betone erfahren aufgrund der höheren Versuchstemperatur nochmals eine leichte Reduzierung gegenüber den mit 70 °C temperierten Proben.

- Bei gleichartigen Versuchen wies der Basaltbeton - absolut gesehen - fast immer höhere E-Modul-Werte auf als der Rheinkiesbeton.

Auch bei den E-Modul-Versuchen wurden die Betonverformungen ständig registriert, sie konnten aber wegen fehlender Mittel nicht ausgewertet werden. Durch die Auswertung dieser Versuchsergebnisse ließen sich kurzfristig und mit geringem finanziellen Aufwand wichtige Daten für die Auslegung und Bemessung des Behälters gewinnen.

Zur Abrundung des Versuchsprogramms sind noch folgende experimentelle Untersuchungen zu empfehlen:

- E-Modul-Versuche an sog. "bauwerksfeuchtem" Beton,
- E-Modulversuche an 200 °C-Proben (E-Modul-Ermittlung an den 300 °C-Proben erfolgt bei den Kriechversuchen).

6. Schrifttum

- /1/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juni 1984.
- /2/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Probekörperherstellung - Rheinkiesbeton, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 1984.
- /3/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - E-Modul-Versuche, Zwischenbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, November 1985.
- /4/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauerstandsversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, April 1986.
- /5/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Hochtemperaturkriechversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Mai 1986.
- /6/ Diederichs, U.: HTR-Betonversuche - Dauertemperaturversuche, Abschlußbericht zur Untersuchung im Auftrage der HRB GmbH, Mannheim. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, März 1986.

Tab. 5: Elastizitätsmodul von Basaltbeton in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bei erhöhten Temperaturen

Basaltbeton			E-Modul											
Proben-Nr.	Temperatur °C		bei Einbau (kalt)		1 Tag		7 Tage		28 Tage		56 Tage		90 Tage	
	Soll	Ist	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%
A 313	70	69	46,3	100	42,3	91,4	41,2	89,0	41,8	90,3	-	-	-	-
A 323	70	67	45,8	100	41,8	91,3	41,7	91,0	40,9	89,3	-	-	-	-
A 321	70	95,5 ^{*)}	43,5	100	36,4 ^{*)}	83,7	37,6 ^{*)}	86,4	37,4 ^{*)}	86,0	-	-	38,1 ^{*)}	87,6
A 307	70	70	43,9	100	40,2	91,6	38,5	87,7	-	-	-	-	-	-
\bar{x}	-	-	44,9	100	41,4	91,4	40,5	89,2	41,4	89,9	-	-	-	-
A 330	120	95 ^{*)}	46,4	100	39,1 ^{*)}	84,3	39,4 ^{*)}	84,9	36,1 ^{*)}	77,8	-	-	35,8 ^{*)}	77,2
A 308	120	123	51,4	100	42,3	82,3	- ^{**)}	-	38,6	75,1	36,9	71,8	37,6	73,2
A 312	120	118	47,2	100	39,3	83,3	36,7	77,8	33,9	71,8	34,5	73,1	34,5	73,1
A 301	120	120	46,3	100	38,7	83,6	36,4	78,6	-	-	-	-	-	-
\bar{x}	-	-	47,8	100	40,1	83,1	36,6	78,2	36,3	73,5	35,7	72,5	36,1	73,2
A 317	20	20	49,5	100	48,8	98,6	47,2	95,4	47,1	95,2	-	-	47,5	96,0
A 326	20	20	50,6	100	52,3	103,4	50,9	100,6	52,9	104,5	-	-	51,7	102,2
A 334	20	20	47,7	100	50,0	104,8	48,4	101,5	50,6	106,1	-	-	48,3	101,3
A 311	20	20	48,0	100	46,5	96,9	44,9	93,5	44,0	91,7	-	-	-	-
\bar{x}	-	-	49,0	100	49,4	100,9	47,9	97,8	48,7	99,4	-	-	49,2	99,8

*) Aufheizung unplanmäßig; wurde wurden nicht bei der Mittelwertbildung berücksichtigt.

**) fehlt wegen Heizungsstörung; Temperaturen waren kurzzeitig auf ca. 70 °C abgesunken.

Tabelle 6: Elastizitätsmodul von Rheinkiesbeton in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bei erhöhten Temperaturen

Rheinkiesbeton			E-Modul									
Proben-Nr.	Temperatur °C		bei Einbau (kalt)		1 Tag		7 Tage		28 Tage		90 Tage	
	Soll	Ist	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%	kN/mm ²	%
R 302	70	74	39,1 ^{*)}	100	41,2	105,4	40,2	102,8	39,8	101,8	38,6	98,7
R 310	70	77	38,9	100	38,2	98,2	38,1	97,9	37,2	95,6	37,4	96,1
R 231	70	73	37,3	100	36,8	98,7	38,5	103,2	37,8	101,3	36,4	97,6
\bar{x}	-	-	38,4	100	38,7	100,8	38,9	101,3	38,3	99,7	37,5	97,5
R 233	120	118	36,4	100	36,2	99,5	35,1	96,4	33,2	91,2	31,2	85,7
R 306 ^{**)}	120	118	28,9	100	28,3	97,9	27,2	94,1	25,8	89,3	25,3	87,7
R 328	120	120	36,6	100	36,0	98,4	35,3	96,4	32,6	89,1	32,5	88,8
\bar{x}	-	-	-	100	-	98,6	-	95,6	-	89,9	-	87,4
R 116	20	20	36,4	100	38,3	105,2	38,0	104,4	38,6	106,0	40,7	111,8
R 126	20	20	33,0	100	37,0	112,1	39,1	118,5	41,9	127,0	42,8	129,7
R 109	20	20	38,3	100	40,7	106,3	40,7	106,3	41,5	108,4	43,2	112,8
\bar{x}	-	-	35,9	100	38,7	107,9	39,3	109,7	40,7	113,8	42,2	118,1

*) Aufheizung unplanmäßig

**) ein Meßkanal defekt → Werte nicht gemittelt

Tabelle 7: Im Rahmen der E-Modulversuche ermittelte Ergebnisse von Festigkeits- und E-Moduluntersuchungen an Basaltbeton

Proben-Nr.	Versuchstemperatur [°C]	E-Modul [kN/mm ²]	(Rest) [%]	Restfestigkeit [N/mm ²]	Restfestigkeit [%]	Probenalter bei Versuchsbeginn [d]
A 313	69	41,7	90,1	65,7	83,2	218
A 323	67	40,4	88,2	63,5	80,4	218
A 321	95,5 ^{*)}	32,8	75,4	48,3	61,1	107
A 307	70	37,9	86,3	57,5	72,8	106
\bar{x}	-	40,0	88,2	62,2	78,8	-
A 330	95 ^{*)}	29,6	63,8	53,5	67,7	100
A 308	123	34,1	66,3	52,7	66,7	352
A 312	118	33,1	70,1	55,1	69,7	352
A 301	120	37,3	80,6	57,8	73,2	95
\bar{x}	-	34,8	72,3	55,2	69,9	-
A 317	20	49,4	99,8	69,4	87,8	448
A 326	20	50,6	100,0	70,8	89,6	448
A 334	20	49,1	102,9	72,4	91,6	448
A 311	20	44,0	91,7	57,3	72,5	130
\bar{x}	-	48,3	98,6	67,5	85,4	-

*) Temperaturniveau nicht korrekt, Werte wurden bei der Mittelwerbildung nicht berücksichtigt.

A 301 ... A 336: $100 \% \hat{=} \beta_c = 79 \text{ N/mm}^2$; $E = 49,4 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 8: Im Rahmen der E-Modulversuche ermittelte Ergebnisse von Festigkeits- und E-Moduluntersuchung an Rheinkiesbeton

Proben-Nr.	Versuchstemperatur [°C]	E-Modul (Rest)		Restfestigkeit		Probenalter bei Versuchsbeginn [d]
		[kN/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[%]	
R 302	74	34,8	89,0	65,7	102,7	144
R 310	77	37,2	95,6	59,1	92,3	144
R 231	73	35,2	94,4	65,5	100,8	151
\bar{x}	-	35,7	93,0	63,4	98,6	-
R 233	118	33,0	90,7	56,7	87,2	151
R 306	118	34,1	92,2	58,7	91,7	225
R 328	120	29,7	81,2	43,8	68,5	225
\bar{x}	-	32,3	88,0	53,1	82,5	-
R 116	20	38,2	105,0	86,3	132,8	256
R 126	20	42,4	128,5	84,2	129,5	256
R 109	20	35,6	92,7	88,8	136,6	256
\bar{x}	-	38,7	108,7	86,4	133,0	-

R 301 ... R 336: 100 % $\hat{=}$ β_c = 64 N/mm² ;

R 101 ... R 136: 100 % $\hat{=}$ β_c = 65 N/mm² ;

R 221 ... R 240: 100 % $\hat{=}$ β_c = 65 N/mm² ;

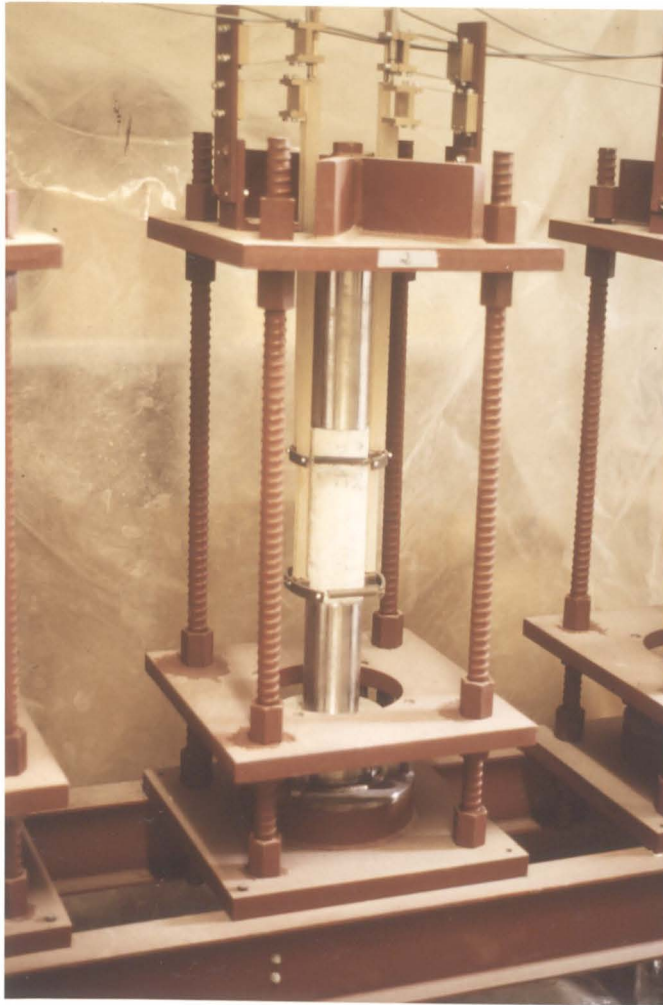


Bild 1: Pneumatischer Kriechprüfstand mit zum Einbau
vorbereitetem Probekörper

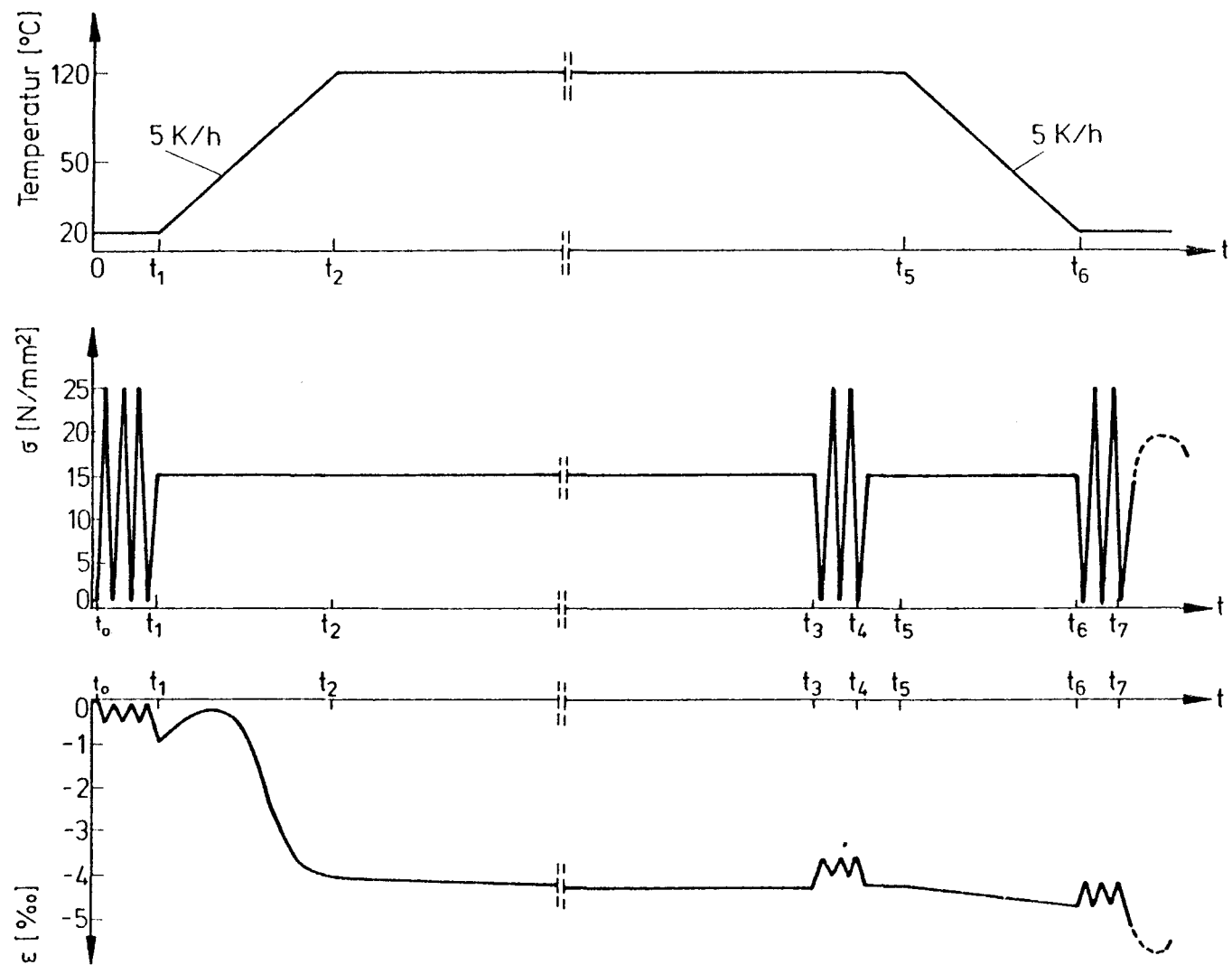


Bild 2: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung zur Ermittlung des E-Moduls bei hohen Temperaturen

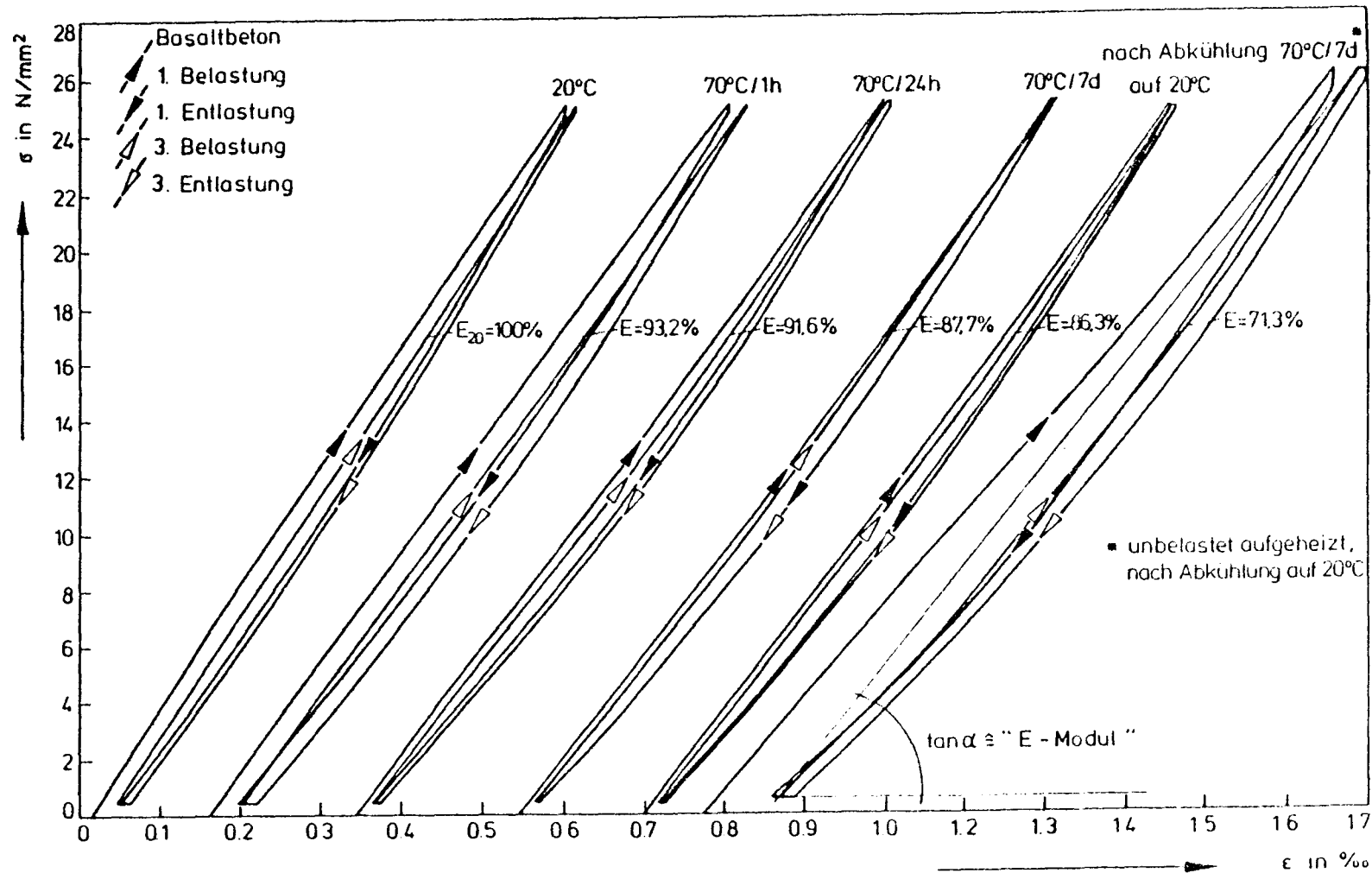


Bild 3: σ - ϵ -Verläufe von Basaltbetonproben, die während des Temperierens mit 15 N/mm^2 belastet worden waren, im Vergleich zu unbelastet aufgeheizten Proben

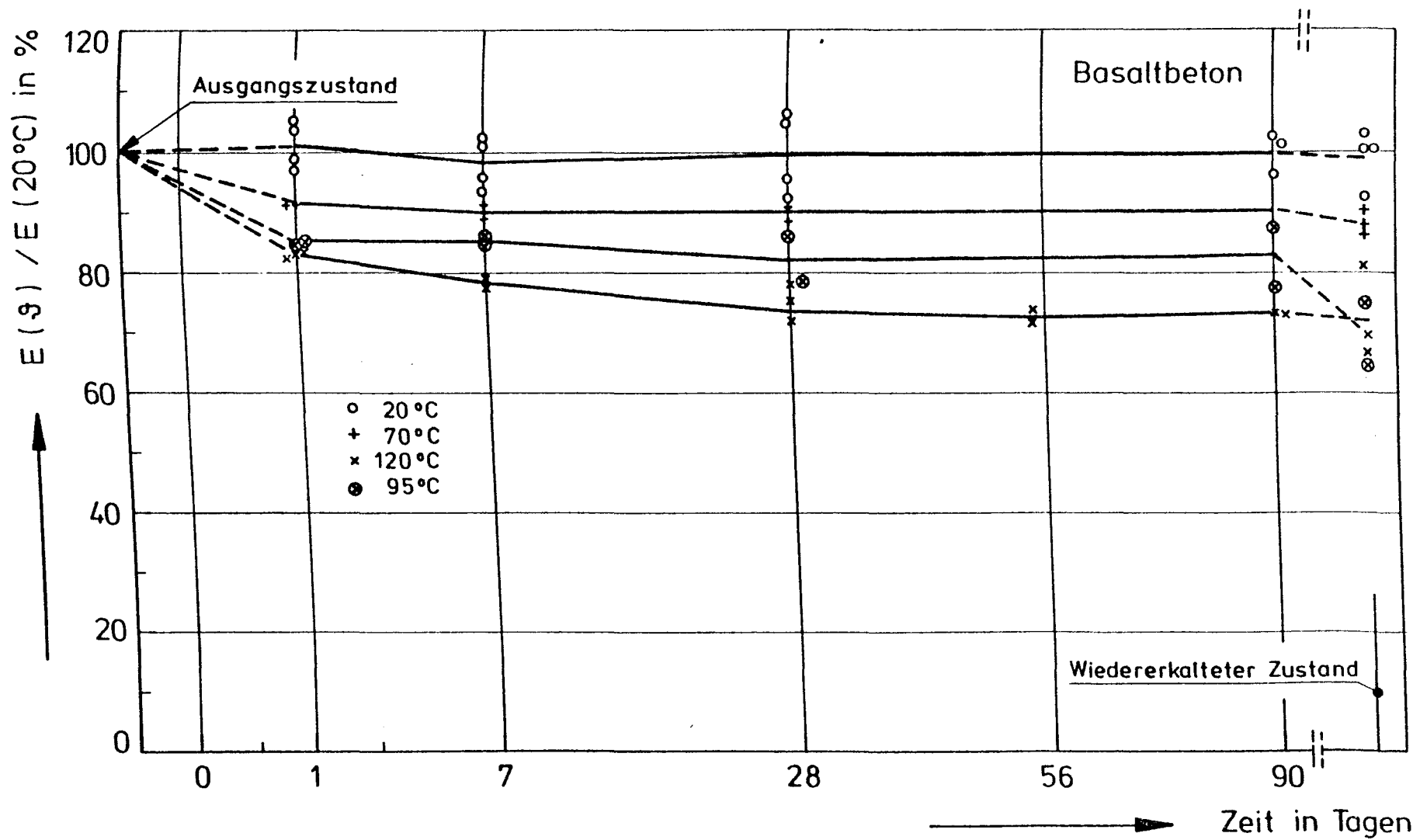


Bild 4: Einfluß der Temperierungsdauer auf den E-Modul von Basaltbetonproben, die während der Temperierung mit 15 N/mm² belastet waren

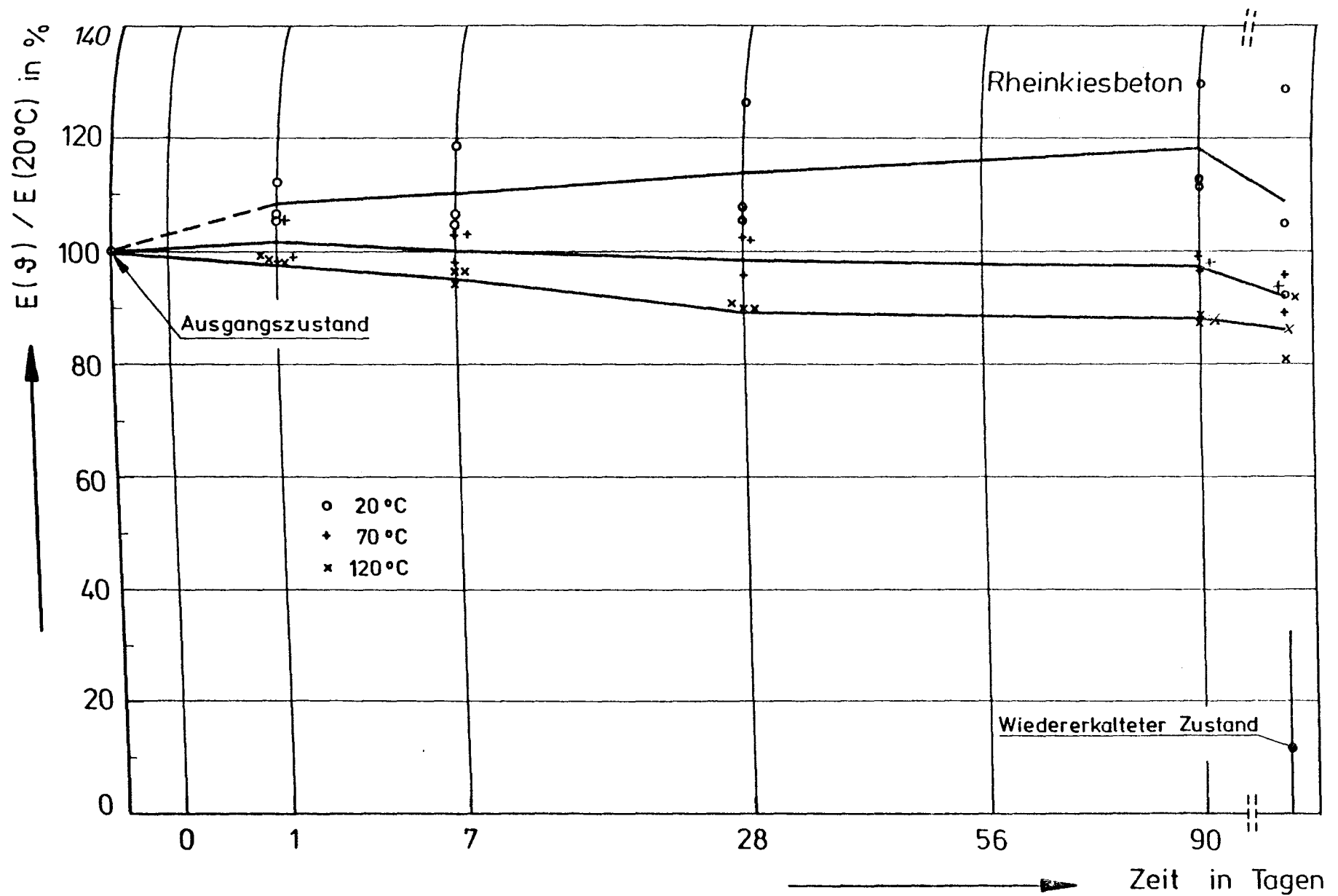


Bild 5: Einfluß der Temperierungsdauer auf den E-Modul von Rheinkiesbetonproben, die während der Temperierung mit 15 N/mm² belastet waren

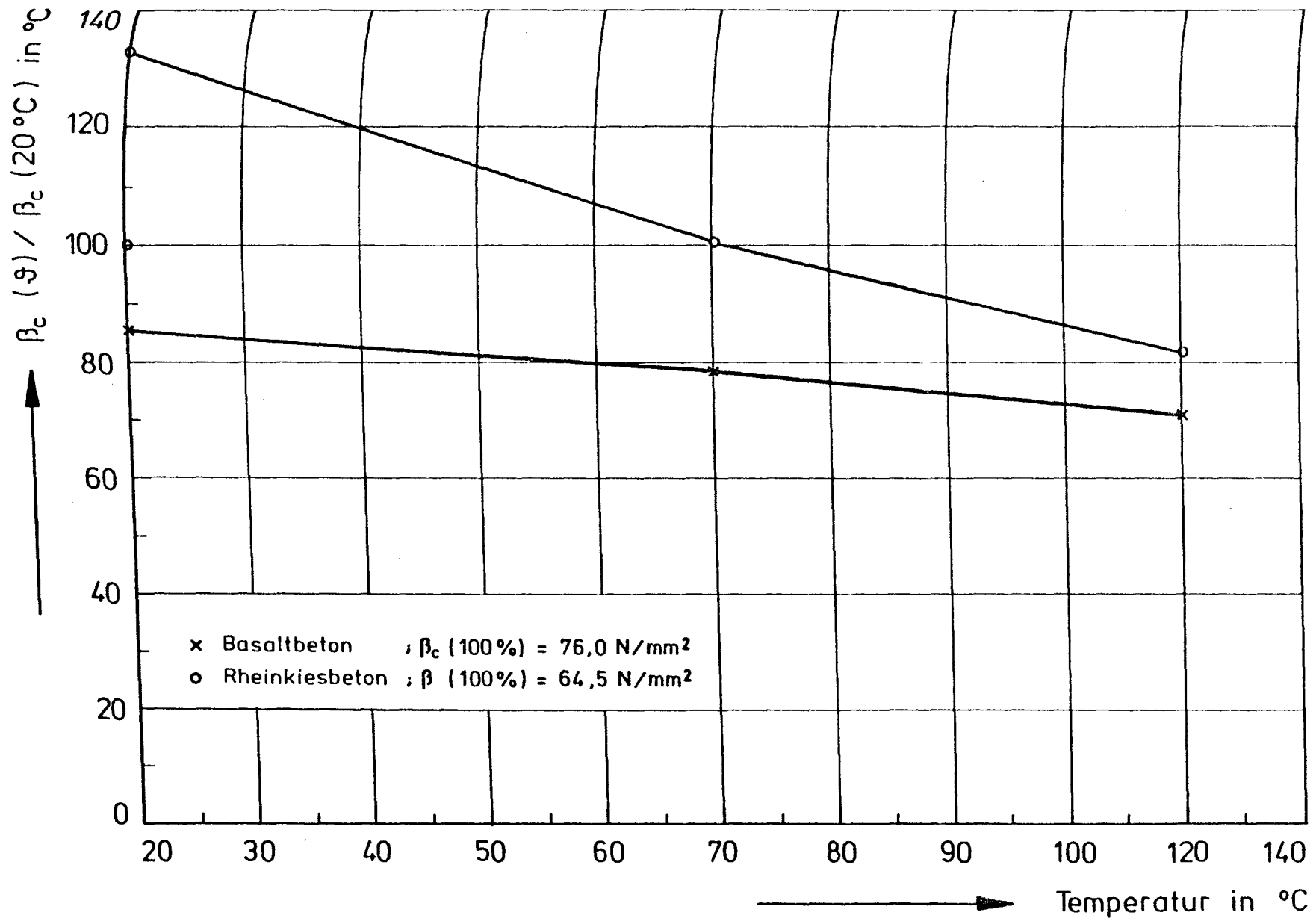


Bild 6: Restfestigkeit von Basalt- und Rheinkiesbetonproben, die 90 Tage lang bei einer Belastung von 15 N/mm^2 temperiert worden waren, in Abhängigkeit von der Beanspruchungstemperatur